UNA PROPUESTA DE SISTEMA DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA LA CUENCA BAJA DEL RÍO CAÑAVERALEJO

Presentado Por:
Efraín Alberto Jiménez Ríos

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente
Programa Académico de Ingeniería Sanitaria
Santiago de Cali
2012

UNA PROPUESTA DE SISTEMA DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA LA CUENCA BAJA DEL RÍO CAÑAVERALEJO

Presentado Por:
Efraín Alberto Jiménez Ríos

Trabajo de grado presentado como requisito
Para optar al título de Ingeniero Sanitario

Director:
Alberto Galvis Castaño, M.Sc.
Instituto CINARA – Universidad del Valle

Asesor:
Francisco Camacho Castrillón, Ing.
Empresas Municipales de Cali - EMCALI

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente
Programa Académico de Ingeniería Sanitaria
Santiago de Cali
2012

Nota de aceptación:

____

____

____

Alberto Galvis C.
Director

____

Henry Jiménez
Jurado

____

Luis Hernando V.
Jurado

Santiago de Cali, Marzo de 2012

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme alcanzar este logro, importante en mi vida.

A mis padres Efraín Jiménez y Nelly Ríos por su apoyo incondicional y constante.

A mis profesores, por sus enseñanzas y conocimientos compartidos.

A todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron para alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo de grado fue elaborado bajo la dirección del ingeniero Alberto Galvis a quien agradezco sinceramente, el tiempo esfuerzo y dedicación para logar culminar este proyecto con éxito.

Ingeniero Francisco Camacho por sus conocimientos y apoyo aportado en el desarrollo de este trabajo.

Al Instituto CINARA, en cabeza de su directora Inés Restrepo, por permitirme desarrollar el presente trabajo en sus instalaciones y por el apoyo logística prestada, como también a todos los funcionarios del Instituto que de una u otra manera, fueron pieza fundamental en el desarrollo del presente trabajo

Al grupo de Gestión Integrada de Recursos Hídricos, del instituto CINARA y a todos los compañeros de trabajo.

A los ingenieros Carlos Martínez, Luisa Fernanda Calderón Vallejo, María Fernanda Jaramillo, Diana Zambrano, Edda Cifuentes por su valioso apoyo y don de gente prestos a colaborar en todos los momentos.

A los funcionarios de la CVC, el DAGMA, EMCALI, que facilitar la información requerida para poder adelantar este proyecto.

Al profesor Andrés Caicedo del Colegio Ideas, por su cooperación, sus conocimientos sobre la cuenca del río Cañaveralejo y la información suministrada para la elaborarían de este proyecto.

A todos mis amigos y conocidos que siempre estuvieron pendientes apoyándome, para que no desfalleciera en el logro de esta meta.

RESUMEN

El sistema de drenaje urbano de la ciudad de Cali en el área de influencia del rio Cañaveralejo se compone de cauces naturales, de un embalse y colectores artificiales de sección circular, tuberías y canales que transportan aguas lluvias y aguas residuales que descargan al rio Cañaveralejo, el cual descarga al canal interceptor Sur y este posteriormente descarga al rio Cauca, Actualmente la zona sur-occidental de la ciudad se ve afectada cada temporada invernal por las precipitación, que generan picos mayores y con más frecuencia, entre estas la cuenca del río Cañaveralejo; sumados a las limitaciones del sistema de alcantarillado para transitar caudales generados en eventos con periodo de retorno igual o mayor a 10 años. Conocer el estado actual de este sistema de drenaje urbano, en combinación con fenómenos hidrológicos contribuye a optimizar las soluciones orientadas a mitigar las inundaciones en el área de estudio. Por medio de los sistema de drenaje urbano sostenibles (SUDS). Por ello se emplea como herramienta hidroinformática el programa EPA-SWMM ver 50022, el cual trae un nuevo módulo para la simulación de los SUDS o LID (desarrollo de bajo impacto). Se realizó un diagnóstico de la zona de estudio, para localizar las zonas afectadas por las inundaciones, y así seleccionar un conjunto de alternativas de drenaje sostenibles para controlar caudales pico, los cuales finalmente fueron evaluados para observar su eficiencia y capacidad de laminar caudales picos. En el proceso se realizó la calibración preliminar de la cuenca alta del río Cañaveralejo encontrar los parámetros sensibles para esta.

Palabras claves: Alcantarillado, Drenaje Urbano, EPA-SWMM, SUDS, Río Cañaveralejo.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

ABREVIATURAS

EMCALI	Empresas Municipales de Cali.
DAGMA	Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente.
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
FORESEE	Operational Flood Forecasting, Warning and Response for Multi-Scale Flood Risks in Developing Cities.
SWMM	Storm Water Management Model.
SUDS	Sustainable Urban Drainage System
BMPs	Best Management Practices
LID	Low Impact Development.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Cañaveralejo, fue transformada a medida que la zona sur-occidental de la ciudad de Cali, crecía desordenadamente, haciendo cambios significativos en el curso de su cauce principal e invadiendo las zonas ribereñas de este. El cambio de cauce natural a artificial, la paulatina densificación de la zona y la poca capacidad hidráulica del sistema de alcantarillado fueron aumentando los problemas asociados con las inundaciones en esta área, siendo cada vez mayores y con más frecuencia.

Actualmente el sistema de drenaje urbano de influencia del río Cañaveralejo, lo componen los canales pluviales Cristales, Av. de los Cerros, Canal río Cañaveralejo, San Fernando, Autopista 3, Pasoancho 1 y Calle 14, los cuales drenan sus aguas al río y este a su vez al Canal interceptor Sur.

Realizar un diagnóstico sobre la zona de estudio se hace clave para conocer el comportamiento del sistema de drenaje urbano y su interacción con los fenómenos hidrológicos y con base en este diagnostico, seleccionar y proponer sistemas de drenajes urbanos sostenibles, los cuales se evalúan, apoyándose en la modelación como un herramienta viable y eficiente.

El presente proyecto se desarrolló en el marco del Proyecto FORESEE (Operational Flood Forecasting, Warning and Response for Multi-Scale Flood Risks in Developing Cities), el cual se ejecuta en convenio entre el Instituto Cinara de la Universidad del Valle, en convenio con UNESCO-IHE en el marco del Partnership Research Fund (UPaRF), con la participación de otras instituciones nacionales e internacionales.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La zona sur-occidente de la ciudad de Cali registra eventos de inundaciones desde 1956, cuando los previos aledaños a la Plaza de Toros Cañaveralejo, fueron urbanizados y el curso del río fue canalizado para evitar las inundaciones de barrios aledaños a este. En el transcurso de la evolución de la cuenca esta se fue densificando aceleradamente, disminuyendo el coeficiente de infiltración de los suelos, el tiempo de retención de la escorrentía y aumentando la impermeabilidad de estos. Lo cual hizo que el sistema de drenaje diseñado originalmente para la zona, disminuyera su capacidad hidráulica frente al volumen de escorrentía aportado por su área de drenaje.

Sumado a esto la cuenca alta de río Cañaveralejo, se vio impactado por procesos de erosión y deforestación, aumentando la capacidad de sedimentos y materiales de arrastre, que incrementaron los eventos de inundación y contaminación. Las soluciones y estudios adelantados en la cuenca del río para mitigar este tipo de problemas y otros, no han tenido la orientación, la visión para prevenir ò resolver de fondo estos problemas

Una forma de contribuir a este tipo de problemas es la implementación de alternativas no convencionales, que permitan reactivar el ciclo hidrológico de la zona, orientadas al sistema de drenaje, apoyándose en la modelación como una herramienta útil para el manejo de sistemas complejos.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de drenaje sostenible para la cuenca baja del río Cañaveralejo; en el marco de soluciones sostenibles y en el contexto de la gestión integral del recurso hídrico.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un diagnóstico del sistema de drenaje de la cuenca del río Cañaveralejo, considerando el sector rural y urbano.

- Proponer un conjunto de alternativas de sistemas de drenaje sostenible; como una estrategia del control de inundaciones y minimización de la contaminación del recurso hídrico en la cuenca baja del río Cañaveralejo.

- Selección de alternativas y esquema conceptual de sistemas de drenaje sostenibles (SUDS), para la zona baja de la cuenca del río Cañaveralejo.

4. MARCO CONCEPTUAL

4.1 TEORÍA GENERAL DE LOS SISTEMAS

La teoría general de los sistemas es un área lógico-matemática cuya tarea es la formulación y derivación de aquellos principios que son válidos para los “sistemas” en general (Latorre, 1996; Von, 2000); busca en el sentido más estricto derivar, partiendo de una definición general de “sistemas” como complejo de competencias interactuantes, conceptos característicos de totalidades organizadas, tales como interacción, suma, mecanización, centralización, competencia, finalidad entre otros y aplicarlos a fenómenos concretos (Osorio, 2008).

En un sentido amplio, la Teoría General de Sistemas (TGS) se presenta como una forma sistemática y científica de aproximación y representación de la realidad y, al mismo tiempo, como una orientación hacia una práctica estimulante para formas de trabajo transdisciplinarias (Arnold & Osorio, 1998).

Según (Andrade, 1997, citado por (Delgado & Pulido, 2005)) se entiende por sistemas un conjunto de entidades caracterizadas por ciertos atributos que tienen relaciones entre sí, clasificados según su relación con el ambiente o grado de aislamiento en cerrados y abiertos, la forma sistemática y científica de aproximación y representación de la realidad incluye la relación del sistema con el medio que lo rodea, permitiendo pronosticar futuros comportamientos de los fenómenos sobre la base del conocimiento y ante variaciones del medio o escenarios donde se producen.

4.2 SOSTENIBILIDAD

El concepto de sostenibilidad se enuncia en octubre de 1984, cuando por solicitud de la Asamblea General de las Naciones Unidas, se reúne por primera vez la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo en el sentido de establecer una agenda global para el cambio; el lema de la comisión partió de la convicción de que es posible para la humanidad construir un futuro más justo y más seguro.

En abril de 1987, se publica un informe denominado “Nuestro Futuro Común” (Our Common Future) o informe Brundtland; el concepto de sostenibilidad se fundamenta en satisfacer las necesidades de la actual generación sin sacrificar la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades (Brooks, 1990).

En la cumbre de Rio de Janerio en 1992 el tema principal fue el desarrollo sostenible; con el precedente que se deja en ese momento se formulan las pautas de los sistemas de drenaje sostenibles (SUDS), buscando un equilibrio en las zonas desarrolladas, y rompiendo con los paradigmas en el diseño y construcción de los sistemas de alcantarillado convencionales.

Definiciones más amplias de sostenibilidad, se han creado desde entonces, según (WASH, 1993; citado por (Suárez & Zea, 2003) es la capacidad de un sistema para continuar desem-

peñando sus funciones a un nivel aceptable y por un periodo indefinido de tiempo utilizando solo los insumos especificados en el diseño del sistema. Un sistema sostenible es el que es capaz de suministrar un nivel apropiado de beneficios durante un extenso periodo de tiempo después de que la parte principal de la asistencia financiera, administrativa y técnica de un ente externo ha terminado.

4.3 GESTIÓN INTEGRADA DEL RECURSO HÍDRICO

La Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH) es una respuesta de la última década a los problemas mundiales, regionales, nacionales y locales de escasez, calidad y saneamiento del agua, así como su acceso universal que tienen una relación muy íntima con la pobreza. Según (GWP, TAC, 2000; citado por (Palacios, 2006)) los GIRH son un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los sistemas vitales; ello implica una mayor coordinación en el desarrollo y gestión de tierras, aguas superficiales y subterráneas, cuencas fluviales y entornos costeros y marinos adyacentes, e intereses aguas arriba y aguas abajo. (Prochat, 2008).

Los GIRH son una herramienta flexible que ayuda a afrontar los retos que plantea el agua y a optimizar la contribución de ésta en un proceso de desarrollo sostenible. No se trata de una meta en sí misma. Los GIRH permiten reforzar las estructuras de gestión de aguas al objeto de fomentar una adecuada toma de decisiones en respuesta a unas necesidades y situaciones siempre cambiantes. Pretende evitar la pérdida de vidas, el despilfarro de dinero y el agotamiento de los recursos naturales derivados de un proceso de toma de decisiones que no toma en cuenta las ramificaciones más amplias de las acciones sectoriales. Su fin es garantizar un desarrollo y gestión equitativos del agua y dar respuesta a las distintas necesidades que tienen en este ámbito el colectivo de mujeres y las capas de población más desfavorecidas. Busca asegurar un empleo del agua en pro de los objetivos de desarrollo socioeconómicos de los países, en una manera que no aventure la sostenibilidad de los ecosistemas esenciales ni ponga en peligro la capacidad de las generaciones futuras a la hora de satisfacer sus demandas de agua (GWP, 2005).

La Gestión Integral del Recurso Hídrico es un proceso dinámico, interactivo y complejo, se nutre de un conjunto de principios rectores, que sustentan el abanico de políticas a ser adoptadas por la sociedad, a través de las instancias de difusión y gubernamentales, para lograr los objetivos propuestos. Se expresa por medio de acciones o medidas de carácter físicos o estructurales (normas, planes y programas, reglamentos, instrumentos económicos y financieros, etc.) (Rodríguez, 2008).

4.4 HIDROLOGÍA URBANA

La hidrología urbana, es la disciplina científica del ambiente que tiene por objeto el estudio del agua y de sus relaciones con las diferentes actividades humanas en zonas urbanas. Trata particularmente las relaciones entre la gestión de las aguas superficiales y el desarrollo del

espacio en zona urbana (Chebbo et, al 1997 citado por (Torres, 2004)). Un desarrollo urbano sostenible comprende un amplio conocimiento de los fenómenos hidrológicos, hidráulicos y ambientales que genera la urbanización y exige que se cuente con numerosas herramientas para la implementación de técnicas innovadoras de reconciliación con las zonas desarrolladas.

La hidrología urbana, es de gran importancia porque es fundamental en proyectos de ingeniería relacionados con suministro de agua, disposición de aguas servidas, drenaje y protección contra la acción de los ríos. Cuando se aplica la hidrología en áreas urbanas se hace necesario conocer las características de la cuenca hidrográfica o cuenca de drenaje de estudio, la cual corresponde a zonas limitadas por un contorno al interior del cual las escorrentías producidas se dirigen hacia un mismo punto de salida o de interés particular, luego de conocer el comportamiento de eventos de precipitación cuando ocurren en áreas urbanizadas o no desarrolladas, en este último caso ocurren dos fenómenos importantes. Primero, aumenta el escurrimiento superficial cuando hay zonas impermeables, y la rapidez con que esta se dirige a cauces naturales o artificiales de agua. Segundo incrementa los caudales máximos, acentuando la probabilidad de sobre pasar los periodos de retornos de las estructuras diseñas para la evacuación de las aguas lluvias, volviendo las zonas bajas más propensas a inundaciones.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 DRENAJE URBANO Y CONTROL DE INUNDACIONES

Los sistemas de drenaje urbano fueron concebidos para reducir el riesgo de inundaciones y los inconvenientes debido a las aguas superficiales estancadas, reducir los riesgos de la salud pública y mejorar la estética de las zonas urbanas. Tradicionalmente el desarrollo del drenaje urbano se ha basado en la expansión constantes de la infraestructura, sin considerar los impactos negativos de las descargas a las fuentes de aguas receptoras.

Existen dos sistemas de drenajes reconocidos: el combinado y el separado. El sistema combinado transporta tanto la escorrentía superficial y las aguas residuales municipales por un solo conducto. Por lo general en tiempo seco este caudal es conducido a una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), cuando se presenta un evento de lluvia y es superado la capacidad de los conductos combinados el exceso del flujo es derivado a canales o cuerpos de aguas receptoras; los sistemas separados son diseñados para transportar solo el caudal generado por la escorrentía superficial y entregarlos a cuerpos de aguas superficiales sin ningún tipo de tratamiento (Marsalek *et al.*, 2008).

Los sistemas de drenaje urbano manejan estos dos tipos de efluentes para minimizar los problemas causados a la vida humana y al medio ambiente, por esto el drenaje urbano cuenta con dos interacciones principales con el público y el medio ambiente (Butler & Davies, 2004) . Como se aprecia en la Figura 5.1.



Figura 5.1. Interacción del sistema de drenaje urbano entre el público y el medio ambiente.
Fuente: Adaptado de (Butler & Davies, 2004)

El principio fundamental de los sistemas de desagüe, consisten en drenar lo más eficiente y rápido posible los caudales producidos en un área urbanizada, ya sea producto de actividades antropológicas ó naturales; por lo general las áreas urbanas posee un alto nivel de impermeabilidad lo cual hace que los caudales que se general sean severos y terminen rápidamente en el sistema de alcantarillado. Este principio, se ha convertido en las últimas décadas en un problema para la gestión de las aguas urbanas, ocasionando inundaciones cada vez con mayor frecuencia.

Las inundaciones ocurren cuando las aguas de los ríos, arroyos, alcantarillas de drenaje se desbordan debido a la falta de capacidad hidráulica de estos sistemas, cubriendo zonas donde la población desarrolla la vida en área urbana.

El control de las inundaciones son todas las acciones referentes a mejorar la infraestructura y el equipamiento para el manejo de las aguas urbanas. Trabajando más en armonía con la naturaleza; cambiando el enfoque de los alcantarillados tradiciones.

En control de inundaciones no solo implica medidas en los aspectos técnicos, dada la importancia del tema este se debe formular desde la planeación y el desarrollo de las aéreas urbanas, teniendo acciones orientadas a un manejo integral en la gestión de las aguas urbanas.

El cambio de perspectiva se orienta acciones amigables con el entorno, tratando de reanudar el ciclo hidrológico del agua en las urbes; para mejorar la calidad de vida de sus habitantes y bajar el riesgo de las inundaciones.

5.2 SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLES (SUDS)

El desarrollo de las ciudades, reduce la permeabilidad de las superficies terrestres, mediante la sustitución de carreteras, áreas pavimentadas, techos y cubiertas; que drenan sus aguas a sistemas de alcantarillados y canales. El desmonte de la cobertura vegetal, interrumpe el ciclo hidrológico, de la asimilación, infiltración y evapotranspiración ver Figura 5.2. En el proceso de construcción de infraestructuras, la cobertura vegetal es removida, el subsuelo compactado. Todos estos procesos reducen la cantidad de agua que puede infiltrarse en los suelos, aumentando considerablemente la velocidad con que el agua escurre por las superficies.

La alteración de los patrones de flujo natural (en términos de la cantidad total de la escorrentía y de las tasas de escorrentía) puede dar lugar a inundaciones y erosión de las bancas aguas abajo. La disminución de la percolación en el suelo puede conducir a nivel bajo de agua en los ríos y reducción de la recarga de los acuíferos, así como daños en los cauces de ríos, arroyos y el habitad en general (CIRIA, 2007).

La calidad y la cantidad de la escorrentía en picos de lluvia causan grandes perjuicios al medio receptor por ello los sistemas tradicionales (combinado y separados) actualmente son tema de discusión y de replanteamiento. Frente a esta problemática surgen los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS). Este concepto se originó en Europa, específicamente en el Reunió Unido, en Estados Unidos afínales de los 80 y comienzos de los 90 se introduce el término "source control" o control en el origen, refriéndose a técnicas de reducción de escorrentía; el cual nace como "Best Management Practices" ó mejoras prácticas de gestión de bajo impacto para el desarrollo (BMPs), en Austria como gestión integrada de cuencas (ICM) (Bitting, 2006) y en España como mejores prácticas de control (MPC) entre otras acepciones.

Las técnicas utilizadas para eliminar carga contaminante de la escorrentía urbana son las denominadas SUDS. Pero en general a la vez que mejoran la calidad del efluente vertido, reducen los picos de caudales y contribuyen a unas menores dimensiones de la red de drenaje urbano.

Los SUDS nace como una estrategia para proteger y mejorar la calidad del agua, evitando inundaciones, permitiendo la recarga de los acuíferos, mejorando el desarrollo urbano y la calidad de vida (EPA, 1999 citado por. (Castro *et al.*, 2005)); La finalidad de los SUDS es tratar de reproducir de la manera más fiel el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o actuación humana

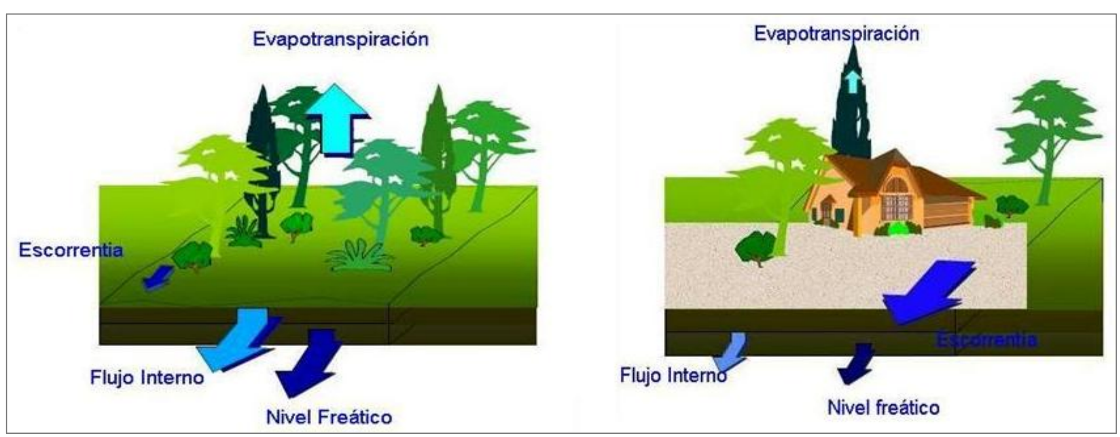


Figura 5.2. Proceso hidrológico pre y post la urbanización.
Fuente: Adaptada de (CIRIA, 2001)

5.2.1 El Concepto de los SUDS

En general se acepta que la aplicación del enfoque SUDS, como oposición a los sistemas de drenaje convencional, proporciona varias ventajas. Adecuadamente diseñados, construidos y mantenidos SUDS puede mejorar la gestión sostenible del agua para un sitio (National SUDS Working Group, 2004) de igual manera llega a la misma conclusión (CIRIA, 2007) y (The Environment Agency *et al.*, 2010) cuando se refiere a los SUDS como sistemas más sostenibles que los métodos convencionales de drenaje, siempre y cuando respecte las premisas de un buen diseño, construcción y mantenimiento, cumpliendo lo anterior se puede alcanzar objetivos como los que se nombran a continuación:

- La reducción de las tasas de escurrimiento, reduciendo así el riesgo de inundaciones aguas abajo.
- La reducción de los volúmenes de escurrimiento adicional y las frecuencias de escorrentía que tienden a ser aumentado como resultado de la urbanización, y que pueden aumentar los riesgos de inundación y el deterioro de la calidad del agua.
- Fomentar la recarga de acuíferos naturales (en su caso) para reducir al mínimo impactos sobre los acuíferos y el nivel de agua en los río y cuencas receptoras.
- La reducción de las concentraciones de contaminantes en el agua lluvia, protegiendo así la calidad de los cuerpos de agua receptoras.
- Reducir el volumen de escurrimiento superficial del agua vertida a los sistemas de alcantarillado combinado, reduciendo los caudales de los vertimientos de agua contaminada a los cuerpos receptores.
- La reducción de la demanda de agua potable por medio de captación de aguas pluviales.

- Contribuir a mejorar el nivel de vida y el valor estético de las zonas desarrolladas.
- Proveen habitad para la fauna silvestre en las zonas urbanas y las oportunidades para la diversidad biológica mejora.

Criterios Generales para la Implementación de los SUDS

El piso jurídico a nivel internacional que adopto el concepto de SUDS, se llevó a cabo en la cumbre de Río en 1992 como consecuencia del trabajo realizado por la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas, y plasmado en el documento llamado "Informe Brundtland (1987)", se plantea un nuevo enfoque en el diseño del drenaje urbano. El desarrollo sostenible tiene como fundamento el considerar para el desarrollo los aspectos económicos, sociales y medioambientales, de forma que los tres puedan coexistir simultáneamente. Al abrigo de este pensamiento, se plantea para el diseño de las ciudades desde el punto de vista del drenaje, el triángulo de la sostenibilidad en el drenaje urbano. Consistente en considerar equilibradamente en el diseño los aspectos relacionados con la cantidad de agua, su calidad y el servicio que ofrece a la sociedad (Bayon *et al.*, 2006)., tal y como se muestra en la Figura 5.3.

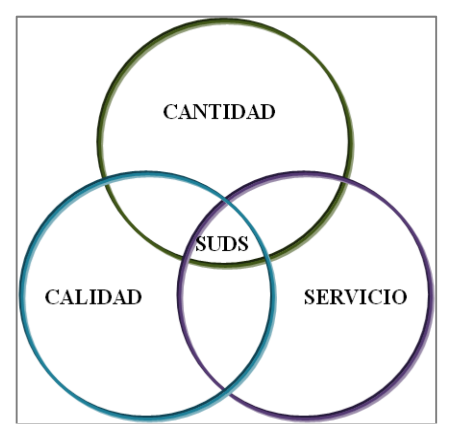


Figura 5.3. Triangulo de sostenibilidad de los SUDS
Fuente: Adaptada de (CIRIA, 2007)

Para imitar los sistemas de drenaje naturales, es necesario establecer una serie de pasos entendidos como una cadena de gestión para reducir progresivamente la contaminación y la reducción de volúmenes y caudales de escorrentías (CIRIA, 2007; Perales & Domenech, 2007).

La cadena de gestión sigue el concepto de tratar el agua antes de la descarga, utilizando los procesos naturales de sedimentación, filtración, adsorción y la degradación biológica así lo afirma (The Environment Agency *et al.*, 2010). Los siguientes autores (Bayon *et al.*, 2006; CIRIA, 2007; The Environment Agency *et al.*, 2010) plantean una jerarquización en el diseño de la cadena de gestión llegando a un consenso que las técnicas que deben ser considerados son la prevención este se basa en la aplicación de las medidas no estructurales, el control en el origen se fundamenta en controlar la escorrentía en la fuente o en sus inme-

diaciones, la gestión en entornos urbanos es la encargada de gestionar el agua en un área local, la gestión en cuencas maneja la escorrentía a escala regional. Ver Figura 5.4.

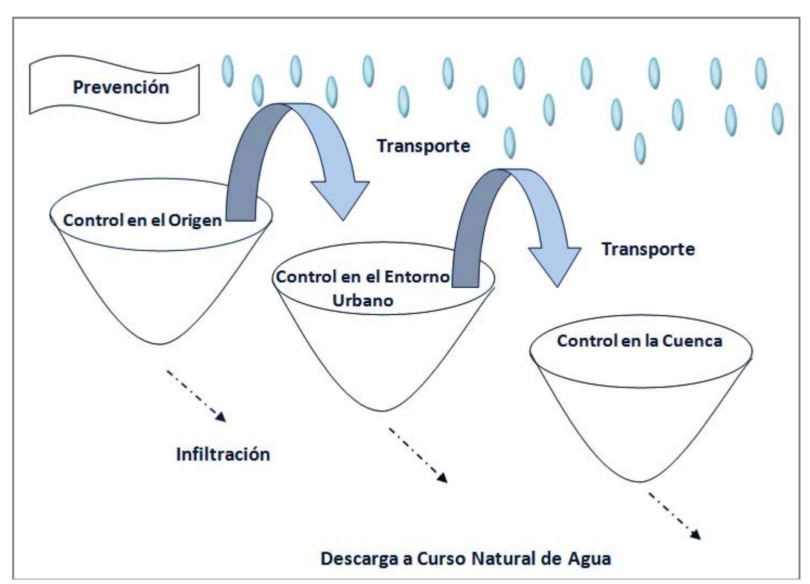


Figura 5.4. Cadena de gestión de los SUDS
Fuente: Adaptado de (Perales & Domenech, 2007)

De la cadena de gestión, se desprenden los pasos para la implementación de los SUDS, de igual forma, brinda los lineamientos que dan origen a la clasificación y componentes de los SUDS, de acuerdo a la etapa del proceso donde se esté.

5.2.2 Clasificación de los SUDS

La gran mayoría de los autores dan una clasificación de los SUDS de acuerdo a sus características hidráulicas, e hidrológicas, a sus aspectos constructivos, logísticos y legislativos. La Agencia Ambiental del Reino Unido, tiene dentro de su clasificación como primer ítem las técnicas de control y prevención, en segundo orden los sistemas de transporte permeable y por último los tratamientos pasivos. (The Environment Agency *et al.*, 2010); (Perales & Domenech, 2007) maneja dos tipologías, las no estructurales y las estructurales, refiriéndose en la primera a las medidas preventivas, de control y la segunda a la gestión en el origen y en la cuenca.

En el mismo sentido (Bayon *et al.*, 2006) propone una clasificación de los SUDS similar.

- Medidas preventivas: legislación, educación, programación económica.
- Sistemas de Infiltración (control en origen): superficies permeables, pozos y zanjas de infiltración, depósitos de infiltración.
- Sistemas de transporte permeable (gestión en el entorno urbano): Drenes filtrantes o drenes franceses, cunetas verdes, franjas filtrantes.
- Sistemas de tratamiento pasivo (gestión en la cuenca): Depósitos de detención, estanques de retención, humedales artificiales.

La filosofía de los SUDS desde sus inicios, trata de reproducir el ciclo hidrológico, por ello se busca recuperar la capacidad de infiltración para bajar los picos de escorrentía; se han encontrado diferente técnica las cuales se muestran en la Tabla 5.1

En la Tabla 5.2 se muestra, un resumen de las tecnologías SUDS, incluyendo las características hidráulicas, la eficiencia de remoción de contaminantes, requerimiento de mantenimiento, y valor agregado en cuanto a habitat y estética.

Tabla 5.1. Clasificación y componentes de los SUDS.

Componente	Descripción
Medidas Preventivas	Se trata de cualquier consideración a nivel de planeamiento que evite que se produzcan los problemas asociados a la escorrentía superficial.
Sistemas de Infiltración (control en el origen)	
Cubiertas vegetadas	Sistemas multicapa con cubierta vegetal que recubren tejados y terrazas de todo tipo. Están concebidas para interceptar y retener las aguas pluviales, reduciendo el volumen de escorrentía y atenuando el caudal pico. Además retienen contaminantes, actúan como capa de aislante térmico en el edificio y ayudan a compensar el efecto *"isla de calor"* que se produce en las ciudades.
Superficies permeables	Pavimentos que permiten el paso del agua a través, abriendo la posibilidad a que ésta se infiltre en el terreno o bien sea captada y retenida en capas sub-superficiales para su posterior reutilización o evacuación.
Franjas Filtrantes	Franjas de suelo vegetado, ancho y con poca pendiente, localizadas entre una superficie dura y el medio receptor de la escorrentía (curso de agua o sistema de captación, tratamiento, y/o evacuación o infiltración). Propician la sedimentación de las partículas y contaminantes arrastrados por el agua, así como la infiltración y disminución de la escorrentía.
Pozos y zanjas de infiltración	Pozos y zanjas poco profundos (1 a 3 m) rellenos de material drenante (granular o sintético), a los que vierte escorrentía de superficies impermeables contiguas. Se conciben como estructuras de infiltración capaces de absorber totalmente la escorrentía generada por la tormenta de diseño para la que han sido diseñadas.
Sistemas de transporte permeable (gestión en el entorno urbano)	
Drenes filtrantes o drenes franceses	Zanjas poco profundas rellenos de material filtrante (granular o sintético), con o sin conducto inferior de transporte, concebidas para captar y filtrar la escorrentía de superficies impermeables contiguas con el fin de transportarlas hacia aguas abajo. Además pueden permitir la infiltración y la laminación de los volúmenes de escorrentía.
Cunetas verdes	Depresiones del terreno vegetadas diseñadas para almacenar e infiltrar gradualmente la escorrentía generada en superficies contiguas. Se promueve así la transformación de un flujo superficial en subterráneo, consiguiendo adicionalmente la eliminación de contaminantes mediante filtración, adsorción y transformaciones biológicas.
Sistemas de tratamiento pasivo (gestión en la cuenca)	
Depósitos de infiltración	Depresiones del terreno vegetadas diseñadas para almacenar e infiltrar y transportar gradualmente la escorrentía generada en superficies contiguas. Se promueve así la transformación de un flujo superficial en subterráneo, consiguiendo adicionalmente la eliminación de contaminantes mediante filtración, adsorción y transformaciones biológicas.
Depósitos de detención en superficie	Depósitos superficiales diseñados para almacenar temporalmente los volúmenes de escorrentía generados aguas arriba, laminando los caudales punta. Favorecen la sedimentación y con ello la reducción de la contaminación
Depósito de detención enterrados	Cuando no se dispone de terrenos en superficie, o en los casos en que las condiciones del entorno no recomiendan una infraestructura a cielo abierto, estos depósitos se construyen en el subsuelo. Se fabrican con materiales diversos, siendo los de hormigón armado y los de materiales plásticos los más habituales.
Estanques de retención	Lagunas artificiales con lámina permanente de agua (de profundidad entre 1,2 y 2 m) con vegetación acuática, tanto emergente como sumergida. Están diseñadas para garantizar largos periodos de retención de la escorrentía (2-3 semanas), promoviendo la sedimentación y la absorción de nutrientes por parte de la vegetación.
Humedales	Similares a los anteriores pero de menor profundidad y con mayor densidad de vegetación emergente, aportan un gran potencial ecológico, estético, educacional y recreativo.

Fuente: Adaptada de (Castro *et al.*, 2005; CIRIA, 2007; National SUDS Working Group, 2004; Perales & Domenech, 2007)

Tabla 5.2. Resultados de eficiencia y de sistema de tratamiento BMPs.

Sistema de Tratamiento	Requerimiento de Diseño Hidráulico	% Eficiencia de Remoción						Requerimiento en Mantenimiento	Hábitat y Valor Estético
		TSS	Nitrógeno Total	Bacterias	Hidrocarburos	Metales			
						Total	Disueltos		
Canales/Sistema de tuberías	Alto	10 - 30	-	-	5 - 10	10 -20	0	• Bajo a moderado • Costoso de remplazar	• Ninguno
Drenes filtrantes o franceses	Bajo -Moderado	60 - 90	20 - 30	20 - 40	70 - 90	70 - 90	10 - 20	• Bajo a Moderado • Costoso de remplazar • Potencial de obstrucción	• Discreto • Ningún valor del habitad
Depósitos de infiltración	Bajo - Alto	60 - 90	20 - 50	70 - 80	70 - 90	70 - 90	20 - 35	• Moderado a alto • Costoso para restablecer • Susceptible a la obstrucción	• Discreto • Limitado valor al habitad
Cunetas verdes	Alto	10 - 40	10 - 35	30 - 60	60 - 75	70 - 90	15 - 25	• Más costoso que el drenaje convencional.	• Atractivo visual moderado • plantación selectiva puede aumentar el valor del hábitat
Laguna de sedimentación	Bajo -Moderado	50 - 85	10 - 20	45 - 80	60 - 90	60 - 90	20 - 30	• Moderada a alto • Costo de dragado	• Algunos valores estéticos
Oil/Grit- Interceptor	Bajo -Moderado	30 - 70	10 - 15	35 - 65	40 - 80	30 - 60	0 - 5	• Moderado a alto • Costoso de mantener	• Ninguno
Depósito de detención enterrado	Moderado - Alto	60 - 80	20 - 40	20 - 40		40 - 55	0 - 15	• Moderado	• Limitado
Depósito de detención en superficie	Alto	30 - 60	5 - 20	10 - 35	30 - 50	20 - 50	0 - 5	• Moderado	• Atractivo visual moderado • Puede aumentar el valor del hábitat
Depósitos de detención • 6-10 horas detención • 16-24 horas detención	Alto Alto	40 – 80 50 - 90	20 – 40 20 - 40	40 – 50 60 - 75	30 – 60 50 - 75	30 – 60 45 - 85	5 – 10 10 - 25	• Moderado a alto • Moderado a alto	• De alto atractivo estético • Moderado a alto valor del hábitat, especialmente si tiene vegetación
Estanques de retención	Alto	80 -90	20 –40	40 - 60	30 - 40	35 - 50	10 - 20	• Moderado	• Moderado
Humedales	Moderado - Alto	70 - 95	30 - 50	75 - 95	50 - 85	40 - 75	15 - 40	• Moderado a alto • Costoso de remplazar	• Alto valor del hábitat y atractivo visual.

Fuente:(Cereve *et al.*, 2010)

5.2.3 Criterios de selección de SUDS

Los Criterios de selección de los sistemas de drenajes urbanos sostenibles, tiene una relación directa con el lugar donde se implementen, dado las condiciones técnicas, ambientales, socioculturales y económicas

Según (CIRIA, 2007; Duque, 2010; Valentín, 2006), los criterios más importantes para la selección de los SUDS son:

a. Características del uso del suelo.

- Baja densidad de las áreas de desarrollo.
- Escurrimiento de techos.
- Vías (densidad vehicular y tipo de automotores).
- Uso residencial.
- Uso comercial.
- Uso industrial.
- Construcciones en curso.
- Zonas industriales abandonadas.
- Suelos contaminados.

b. Características del sitio

- Niveles de aguas subterráneas.
- Tipo de suelo.
- Permeabilidad del suelo.
- Disponibilidad de terreno.
- Pendiente del terreno.
- Área tributaria.
- Clima.

c. Características Técnicas

- Control hidráulico.
- Tipo de contaminantes a eliminar y eficiencia de eliminación de los mismos.
- Adaptabilidad al crecimiento urbano.
- Reutilización de agua de escorrentía.
- Riesgos de inundación.

d. Características Ambientales

- Impacto hidráulico en la fuente receptora.
- Impacto en la calidad de la fuente receptora.
- Impacto ecológico en la fuente receptora.
- Recarga de acuíferos.

e. Operación y Mantenimiento.

- Requerimientos de operación y mantenimiento.
- Confiabilidad del sistema.

f. Características Sociales.

- Grado de aceptación de la comunidad.
- Salud pública.
- Creación de habitad.
- Contribución paisajística.

g. Características económicas.

- Inversión inicial
- Operación y mantenimiento

5.3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE

La simulación es el proceso de diseñar o implementar un modelo de un sistema real, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar diferentes escenarios para una realidad propuesta dentro de unos límites impuestos por ciertos criterios.

Para llevar a cabo una simulación se emplea por lo general un modelo, ya sea que se cree ó se emplee uno existente. La modelación es una representación matemática simplificada de un fenómeno físico observable.

Los modelos hidráulicos de los sistemas de alcantarillado tienen dos usos principales: diseñar (nuevos sistemas), y analizar (sistemas existentes). En la actualidad hay diversos tipos de programas para la modelación de alcantarillados. En la Tabla 5.3. Se realiza una comparación de los modelos de simulación urbana más empleado para este fin.

El modelo hidráulico es aquel que se encarga de transportar el agua proveniente de la lluvia y de las descargas residuales. El transporte es descrito mediante las ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos. Debido a que el flujo del agua residual varía con el tiempo y durante los eventos de lluvia, el flujo es gradualmente variado. La descripción matemática de este tipo de flujo se puede hacer con las ecuaciones de Saint Venant. Estas ecuaciones fueron desarrolladas por primera vez por Barre de Saint-Venant en 1871 y describen el flujo unidimensional no permanente en un canal abierto, que es aplicable al flujo en t
uberías parcialmente lleno y variado. Se componen de dos ecuaciones básicas: Ecuación de Conservación de la masa y Ecuación de Conservación de la Energía (Orozco & Saldarriaga, 2005).

Después de la evaluación de los programas existentes en el mercado y sus características se selecciona el EPA-SWMM, como herramienta de modelación para el presente trabajo de grado, por ser el programa más utilizado a nivel mundial y por estar disponible al público sin ningún costo.

Tabla 5.3. Comparación de algunos modelos de simulación urbanos.

Modelo	Simulación		Escala temporal		Cálida	Cantidad	SUDS	Licencia	
	Hidrológica	Hidráulica	Eventos	Continua				Publica	Comercial
MOUSE	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓
MUSIC	✓		✓	✓	✓		✓		✓
P8-UCM	✓				✓		✓	✓	
RUNQUAL	✓		✓		✓		✓	✓	
SLAMM	✓		✓	✓	✓		✓		✓
Storm Tac	✓			✓	✓		✓		✓
EPA-SWMM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
UVQ	✓			✓	✓		✓	✓	
WBM	✓		✓				✓	✓	
HSPF	✓	✓	✓	✓	✓			✓	
MIKE-URBAN	✓	✓	✓	✓		✓			✓
SEWERCAD		✓		✓		✓			✓
STORMCAD	✓	✓		✓		✓			✓
INFOSEWER	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
PC-SWMM	✓	✓	✓	✓		✓			✓
RD_3M-QUAL	✓	✓	✓					✓	

Fuente: Adoptado de (Elliott & Trowsdale, 2007; Zoppou, 2001)

Modelo de Gestión de Aguas pluviales (EPA-SWMM)

El modelo de gestión de aguas pluviales EPA SWMM (Storm Water Management Model) de la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (USEPA, U.S. Environmental Protection Agency), es un modelo numérico que permite simular el comportamiento hidrológico - hidráulico de un sistema de drenaje urbano, tanto en términos de cantidad de agua como calidad de la misma (Jopia, 2007). La estructura del SWMM se observa en la Figura 5.5.

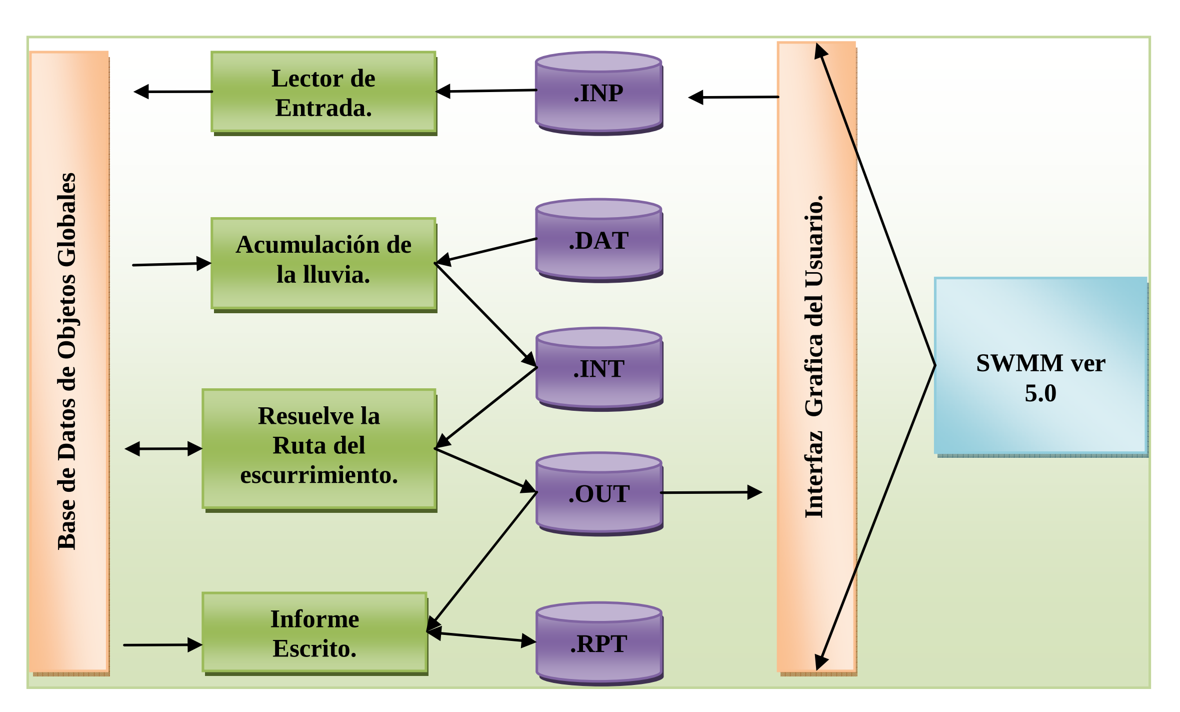


Figura 5.5 Estructura del programa SWMM 5.0
Fuente: Adaptado (Jopia, 2009)

El *módulo de escorrentía o hidrológico* de SWMM funciona con una serie de cuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía; teniendo en cuenta diversos procesos como: las pérdidas por infiltración en zonas permeables, por evaporación y por almacenamiento en depresiones, además de las ganancias que se puedan dar por él derretimiento de nieve. Esto es posible gracias a que se puede definir las condiciones meteorológicas de cada cuenca como la temperatura del aire o la velocidad del viento, la infiltración. El cual es un parámetro importante este se puede modelar por tres métodos: Horton, Green-Ampt y Soil Conservation Service (SCS); además de ello trae la opción de incluir acuíferos. (Pérez, 2007). El *módulo de transporte o hidráulico* de SWMM analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento, tratamiento, bombas y elementos reguladores. El programa no limita el tamaño de las redes modeladas y permite simular regímenes de flujo con sobrecargas, flujo reverso y almacenamiento. Asimismo, SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y la calidad del agua de escorrentía de cada cuenca, así como el caudal, el nivel de agua en los pozos o

la calidad del agua en cada tubería y canal durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo (Gironás *et al.*, 2005). El SWMM tiene una gran variedad de secciones tuberías y canales para modelar una red sin limitaciones de este tipo, además considera secciones irregulares para adaptar cauces naturales. Este permite la inclusión de reglas definidas por el usuario para controlar las bombas, la apertura de orificios y los niveles en los vertederos.

El SWMM realiza los cálculos hidráulicos a partir de la ecuación de Saint Venant, este utiliza tres modelos de propagación del flujo: condiciones de flujo permanente, onda cinemática y onda dinámica. Los módulos utilizados se pueden observar en la Figura 5.6.

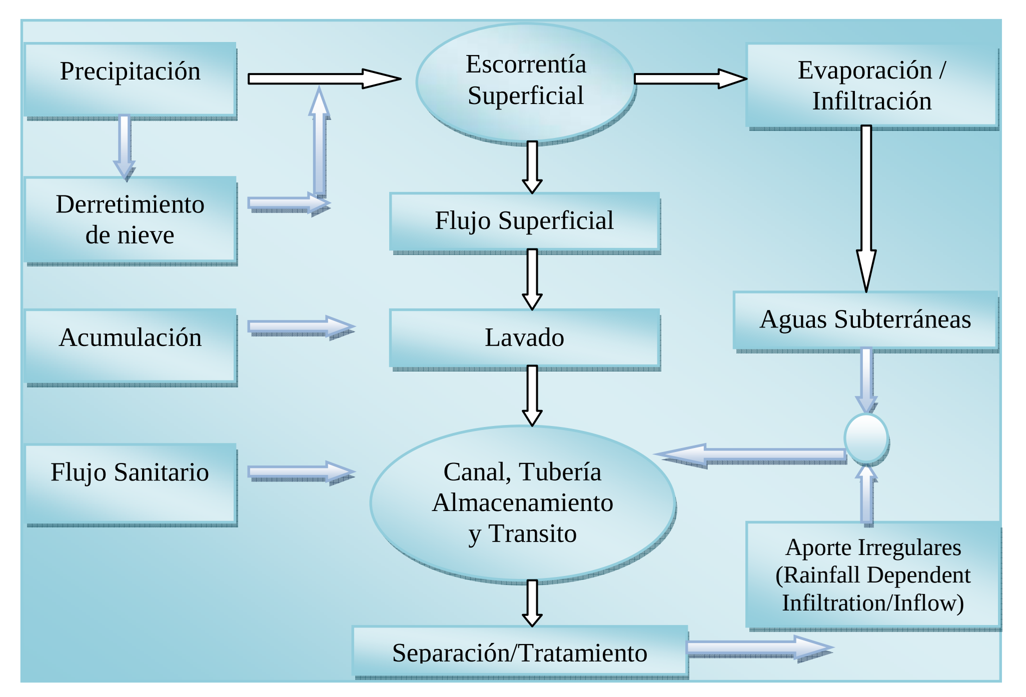


Figura 5.6. Módulos utilizados por SWMM 5.0.
Fuente: Adaptado (Jopia, 2009)

Desde sus orígenes en 1971 hasta nuestros días este modelo ha tenido diferentes cambios, se ha rescrito totalmente su código para hacerlo más versátil y ha tenido grandes mejoras hasta la actualidad, es así como desde el años 2010 se lanzó la versión 50021 esta trajo consigo una novedad, la capacidad de modelar los SUDS o también conocidos como prácticas de desarrollo de bajo impacto (LID), diseñadas para captura la escorrentía superficial y genera una combinación de la detención, la infiltración y la evapotranspiración.

En el nuevo módulo del SWMM, el LID, están disponibles cinco tipos diferentes de estos sistemas: celdas de bioretención, zanjas de infiltración, superficies permeables, cunetas verdes y cisternas.

Para el presente estudio se emplea el programa EPA-SWMM ver 50022, el cual tuvo ajustes respecto la versión que lo precedió en cuanto al módulo de los LID. Para esta investigación la caracterización más importante es la implementación de los SUDS, para control de inundaciones y contaminación difusa.

SWMM se ha utilizado en miles de estudios de aguas residuales y pluviales en todo el mundo. Las aplicaciones típicas incluyen (Jopia, 2009; Lockie, 2009):

- Diseño y dimensionado de componentes del sistema de drenaje para el control de inundaciones
- Estudio y creación de modelos de cuenca urbana.
- Control de vertidos en tiempo de lluvia desde redes pluviales, y de redes combinadas.
- Evaluación de SUDS o LIDs para cumplir con objetivos de sostenibilidad.

Limitaciones del SWMM:

- No aplicable a nivel de grandes cuencas no urbanas.
- Sin rutinas de modelación de transporte de sedimentos y erosión.
- No simula la propagación de contaminantes en el medio receptor ni en el flujo subsuperficial.
- No es una herramienta totalmente integrada respecto a las aguas urbanas.
- Es una herramienta de análisis, no una herramienta automática de diseño.
- Sin conexión integrada con Sistemas de Información Geográfica (GIS).

6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

6.1 LOCALIZACIÓN

La cuenca del río Cañaveralejo está localizada en la zona sur occidental de Cali capital del Valle del Cauca, Colombia. Como se puede apreciar en la Figura 6.1.

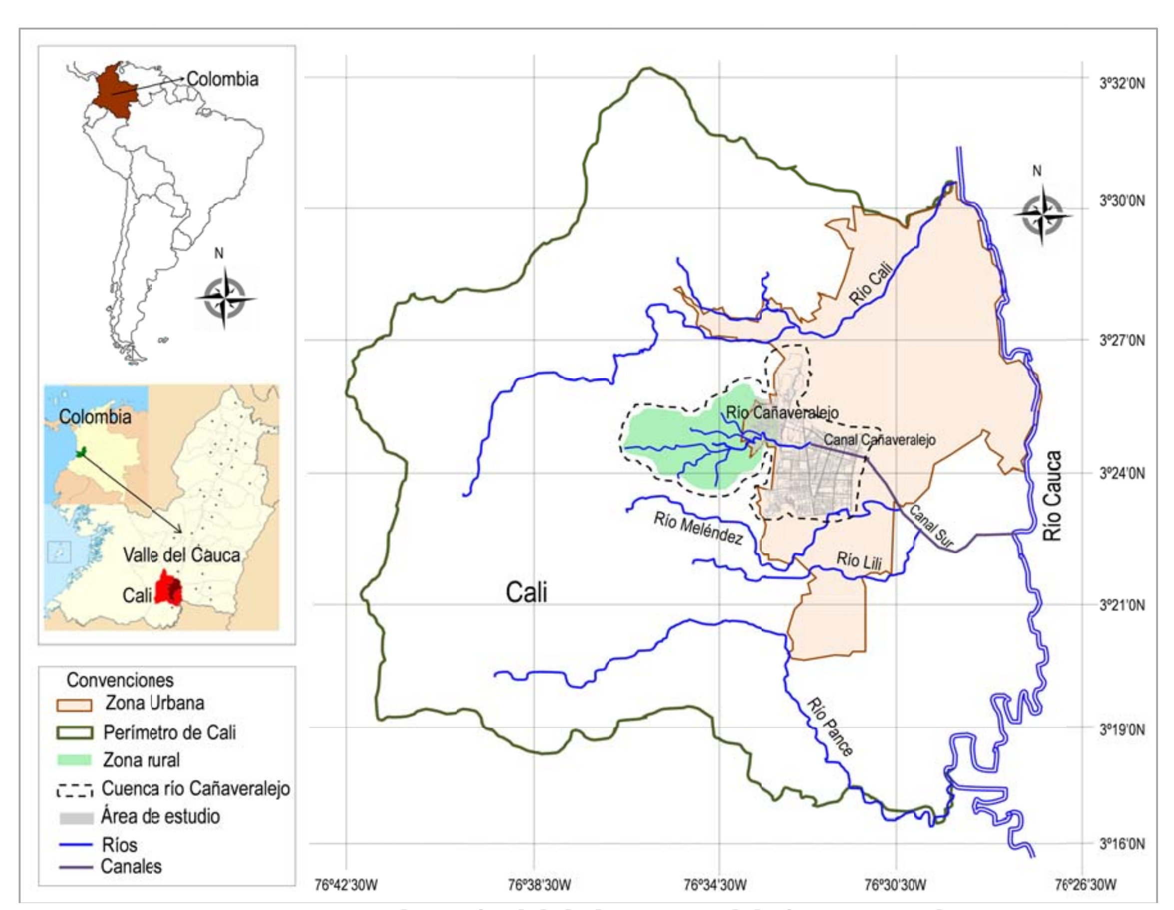


Figura 6.1. Localización del de la cuenca del río Cañaveralejo

6.2 CARACTERISTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El afluente principal de esta cuenca es él río Cañaveralejo de la cual deriva esta su nombre; una de las características son los cambios brusco a los cuales se ve sometido el río en una corta trayectoria en su estado natural contrastándose como: Bosque de Manantial, Bosque Riparío, Potrero, Cultivos, "Balnearios" Públicos, asentamientos de desarrollo incompleto y zona urbana. (Caicedo, 2010). La cuenca del río Cañaveralejo limita por el Noroccidente con la cuenca hidrográfica del río Cali; por el suroccidente con la cuenca hidrográfica del río Meléndez y por el oriente con el casco urbano. El río Cañaveralejo tiene un recorrido que va en dirección occidente – oriente, desde Los Farallones de Cali hasta el casco urbano del municipio, y el cauce de su corriente es muy estrecho. Sus principales afluentes son las

quebradas Guarrús, Isabel Pérez, La Mina, Gómez, Las Brisas, Filadelfia, Pila Seca y el Indio, las cuales reciben descargas de aguas residuales (Gamba, 2008).

La cuenca del río Cañaveralejo tiene un área estimada de 2882 Ha y está dividida según sus pendientes y características en tres unidades geomorfológicas: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja, que van desde los 1.800 msnm en la zona rural del municipio hasta la hasta la cota 955,901 msnm en la desembocadura en el Canal Interceptor Sur, recorriendo una longitud aproximada de 9 Km. La totalidad de las cuencas media y baja del río tiene una longitud aproximada de 7.8 km. (Universidad del Valle *et al.*, 2004a,b).

6.2.1 Cuenca Alta

Comprende desde el nacimiento del Río hasta el sector de La Sirena (desde la altura de 1,800 msnm, hasta 1,005 msnm). El clima corresponde a medio. En esta zona se cuenta con un relieve escarpado y con pendientes entre 25% y 50%, donde el Río atraviesa zonas boscosas con vegetación nativa. En la actualidad esta zona se encuentra intervenida con cultivos a pequeña escala, deforestación y actividad ganadera (Corporación de Estudios Ambientales y Culturales Claustro Abierto, 2009).

6.2.2 Cuenca Media

Se extiende desde La Sirena hasta el ingreso al embalse Cañaveralejo (desde la altura de 1005 msnm, hasta 988 msnm). El clima corresponde a medio y cálido. Se caracteriza por el desplazamiento de la cobertura vegetal y arbórea por la infraestructura domiciliar que ocupa la zona de protección del cauce. La zona ha sido muy afectada por la explotación de minas de carbón, la tala y quema de bosques, la ganadería y la urbanización sin control. Presenta una pendiente promedio de 1.21% (Corporación de Estudios Ambientales y Culturales Claustro Abierto, 2009).

6.2.3 Cuenca Baja

Está comprendida entre el sector del embalse Cañaveralejo y la desembocadura en el Canal Interceptor Sur (desde la altura de 988 msnm, hasta 955 msnm). El clima corresponde a cálido. Se caracteriza por encontrarse completamente urbanizada y con mínimas zonas de vegetación. Entre la plaza de toros y la desembocadura, el Río está canalizado perdiendo así su carácter natural y recibe vertimientos de aguas residuales realizados principalmente mediante canales y tuberías de la red de Alcantarillado “pluvial” al que llegan conexiones erradas, además de residuos sólidos domésticos y escombros, que deterioran su calidad (Corporación de Estudios Ambientales y Culturales Claustro Abierto, 2009).

6.3 GEOLOGÍA

Las rocas cretáceas predominan en la región de la Cordillera Occidental y se encuentran en la cuenca del Cañaveralejo principalmente conformadas por diabasas, basaltos y lavas almohadilladas de la Formación Volcánica Kv. En la cuenca estas rocas se encuentran meteo-

rizadas formando saprolitos definidos como Q/Kv (McCourt & Verdugo, 1985; Verdugo & Aspden, 1984) considerados, desde el punto de vista de ingeniería, como suelos arcillosos, de color rojizo tal y como se puede observar en la Figura 6.2.



Figura 6.2. Arcillas rojas saprolíticas indicadoras de suelos ácidos

6.4 GEOFORMAS Y UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES

En general las geoformas predominantes en la zona de influencia del río Cañaveralejo son conos y depósitos (terrazas, rellenos aluviales). Originados por la sedimentación de los afluentes del río Cauca, correspondientes a los depósitos de los ríos Cañaveralejo y Lili y conos del Cali, Meléndez y Pance.

En la zona de depositación del río Cañaveralejo se encontraban antiguos humedales, entre el río y el antiguo curso de la Quebrada Isabel Pérez, que culminaban al Este en la ciénaga de Aguablanca, alimentada por estos drenajes, la Quebrada Puente Palma y el Zanjón del Medio. En la Figura 6.3, se aprecian las unidades geológicas que forman la cuenca, y en la Tabla 6.1 la descripción.

De acuerdo a la información histórica, geomorfológica e hidrológica del río Cañaveralejo se infiere que esta es una cuenca de alta torrencialidad en el contexto local, con un gran aporte de sedimentos muy finos (a partir de rocas básicas y gruesos saprolitos), sedimentación en un ambiente de súbito cambio de velocidades de flujo sobre terrenos de muy baja inclinación, inundables y lateralmente confinados (Rosales, 2001).

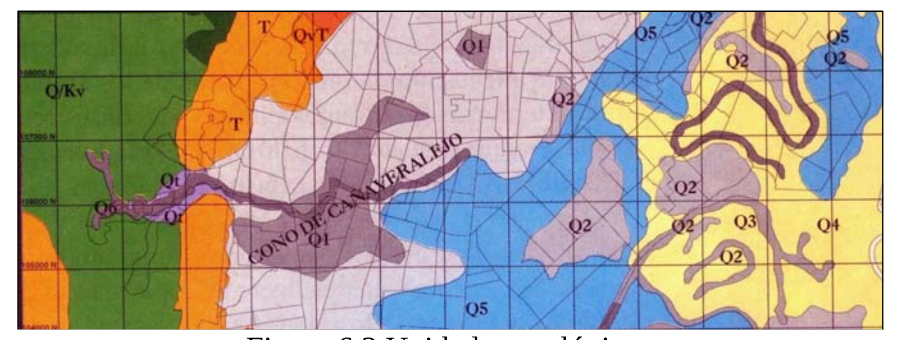


Figura 6.3 Unidades geológicas
Fuente: Adaptada de (Alcaldia Municipal, 1996)

Tabla 6.1.Unidades geológicas superficiales

Unidad	Composición	Estabilidad
Q6 Q5 Q1	Estratos de arenas, limos y arcillas, ocasionalmente intercalados con gravas y bloque de roca, principalmente a lo largo del curso de los ríos. El espesor de estos sedimentos aumenta hacia el Oriente, en donde perforaciones de más de 400 metros no han encontrado rocas del basamento. Los depósitos a lo largo de los ríos que cruzan el área urbana representan, además, la franja mínima que no debió ser urbanizada.	Depende del tipo de material, de su granulometría, grado de consolidación y profundidad del nivel freático. Éste, en general, está a poca profundidad cerca a los cursos de los río y sobre la llanura de inundación que destaca por los colores amarillo (Q4) y azul (Q5) y por la presencia de canales y depósitos de río (Q3) y de pantanos aluviales (Q2). Las excavaciones de brechas o zanjas requieren de tablestacados para evitar derrumbes.
Qt	Terrazas aluviales compuestas por estratos de gravas y arenas parcialmente cementados, en matriz limosa.	Alta, observada en cortes subvertíales.

Fuente: (Alcaldia Municipal, 1996)

En la cuenca alta del Cañaveralejo más del 90% de su área de drenaje discurre sobre saprolitos arcillosos de rocas diabásicas, razón por la cual los sedimentos gruesos son escasos y se concentran en una franja central de la cubeta mencionada, o fueron depositados en la zona de amortiguamiento antes de llegar a la planicie del valle geográfico al Este del Cerro La Bandera. Por otro lado, los espesores de arcillas también pueden haber recibido aportes distales del río Cauca durante grandes inundaciones en el pasado.

6.5 MORFOMETRÍA

En la Tabla 6.2 se incluyen algunos de los parámetros morfométricos de la cuenca del río Cañaveralejo tomados de diferentes estudios realizados por empresas consultoras e instituciones públicas. Se destacan el Factor de Forma (Ff) es uno de los parámetros de forma que mide la relación entre al ancho promedio y la longitud axial de las subcuencas e indica la tendencia a las crecidas, según se observa este parámetros en los estudios revisados este valores están en un rango de (0,43 a 0,76) lo cual indica que la cuenca es susceptible a crecidas, el Coeficiente de compacidades otro parámetro de forma basada en la relación del perímetro de la cuenca con el área de un circulo de igual área, de tal manera que entre mayor sea el coeficiente, más distante será la forma de la cuenca con respecto al círculo según este parámetro la cuenca del Cañaveralejo está más cerca a la forma circular (1,07 -1,63) y la pendiente del cauce (13,12 -20,5) la cual es alta y refuerza el parámetro de Ff en cuanto a las crecidas, entre los valores que confluyen para hacer de la cuenca del Cañaveralejo la de más alta torrencialidad en Cali citado por (Rosales, 2001) esta porción montañosa llega hasta la franja alargada de rocas del Terciario a la altura del Cerro La Bandera y el barrio Siloé, al Oeste de la zona de influencia del río Cañaveralejo, sitio donde la cuenca se cierra antes de llegar a la planicie. Simplificando, la cuenca media del río Cañaveralejo presenta topografía ondulada y suave con formas redondeadas y la cuenca baja corresponde a la zona plana que hace parte del valle geográfico del río Cauca (Gamba, 2008).

Tabla 6.2 Parámetros Morfométricos de la cuenca del río Cañaveralejo

Parámetros	Mayorquín, 1997	Castro & Carrasco, 1997	Hidroingeniería, 2000	CVC, 2001
Área (km^2)	15,34	12,42	24,61	11.5
Longitud del Cauce (Lc) (km)	4,5	4,5	9,0	5,4
Perímetro, (km)	12,5	---	28,76	15,37
Ancho máximo (km)	3,25	---	4,29	2,72
Factor de Forma (Ff)	0,53	0,43	0,76	0,6
Coeficiente de Compacidad (Kc)	1,07	1,07	1,63	1,3
Índice de Alargamiento (la)	1,38	11,38	1,51	1,1
Índice de Asimetría (las)	1,12	---	---	---
Coeficiente de Cubrimiento de Bosques (Cb)	0,06	---	---	---
Coeficiente de Masividad (Km)	117,48	---	---	---
Coeficiente de Torrencialidad	2,63	----	---	---
Pendiente del Cauce %	14	13,12	18	20,5
Sinuosidad	---	---	1,23	---
Longitud de Corrientes (a.m.)	---	27,50	---	---
Densidad de Drenaje (Dd) (a.m./km^2)	---	2,21	1,58	---
Tiempo de Concentración (Tc) (horas)	---	1,32	---	1,2

Fuente: adaptado de: (CVC, 2001; HIDROINGENIERIA LTDA & DAGMA, 2000; MANOV *et al.*, 2007b; Mayorquín & Astrid, 1997)

7. METODOLOGÍA

En la Figura 7.1 se presenta el esquema metodológico que se llevo a cabo en el desarrollo del presente trabajo de grado.

7.1 ELABORACION DEL DIAGNOSTICO

Para la elaboración del presente trabajo se realiza un diagnóstico del área de estudio; el cual se llevó a cabo mediante la consulta, revisión y recopilación de información concerniente a los estudios realizados anteriormente sobre la cuenca del río Cañaveralejo, aspectos históricos, hidrológicos e hidráulicos referentes al sistema de alcantarillado. La información fue suministrada por la CVC, el DAGMA, EMCALI, y la comunidad que habitad la zona; además de información primaria de enfoque académico y/o científico como publicaciones de revistas indexadas, libros, tesis (de pregrado y postgrado).

Se adelantaron reuniones con personal experto de las instituciones antes mencionadas; además de visitas a la zona de estudio en donde se recoge información fotográfica, entrevistas con personas de la comunidad en donde se validó información de estudios existentes y se verifico la misma en campo.

7.2 ALTERNATIVAS DE SISTEMA DE DRENAJE SOSTENIBLE

Las alternativas de los sistemas de drenaje sostenibles se realizan con base, a la revisión de literatura, las características particulares del área de estudio y el diagnóstico de la misma. El proceso de seleccionar las técnicas SUDS adecuadas se basa en la metodología propuesta por (CIRIA, 2007) y (Duque, 2010), adaptadas a las condiciones del área de estudio. Se aplica la cadena de gestión de los SUDS, buscando alternativas de control en el origen y gestión en la cuenca, para plantear un conjunto de opciones para la zona de estudio. Se investigan las características de uso y tipo de suelo, las condiciones del sistema de alcantarillado, los eventos hidrológicos de la cuenca, así como los problemas asociados a estos.

Se analizó el proceso de selección sugerido en el Manual de CIRIA, con lo cual se adapta una matriz de selección de SUDS, teniendo en cuenta las características más relevantes de la zona de estudio, para cruzarlos con los requerimientos técnicos de los SUDS y escoger las alternativas. Se realiza una evaluación de las técnicas SUDS, mediante una modelación para generar la propuesta de estas alternativas.

7.3 PROPUESTA DE SISTEMAS DE DRENAJE SOSTENIBLE

7.3.1 Esquematización del sistema de drenaje

Después de haber realizado la selección de las alternativas de los SUDS, se emplea el modelo de gestión de aguas pluviales EPA SWMM (Storm Water Management Model) versión 5.00.22 (CDM & Rossman, 2010; Gironás *et al.*, 2010; Rossman, 2010). El cual trae

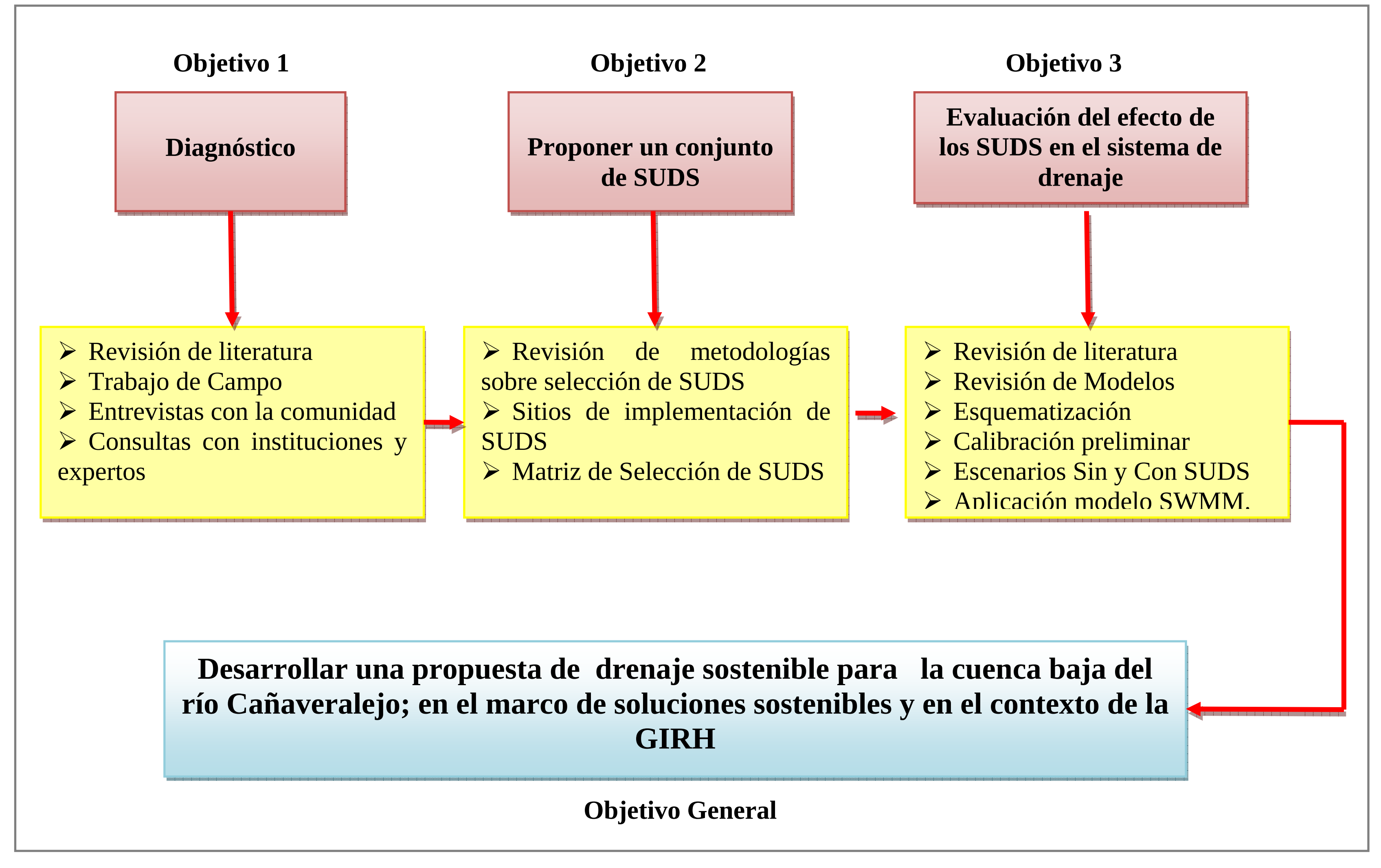


Figura 7.1. Esquema metodológico para el desarrollo del presente trabajo de grado.

Integrado un módulo de simulación de los SUDS, llamado desarrollo de bajo impacto "LID" (Low Impact Development) ver numeral 5.3. Este con el fin de ver el potencial de los SUDS en cuanto al control de la escorrentía, la mitigación de la contaminación difusa y validar la selección y aplicación de estas tecnologías; de acuerdo al contexto local.

Para realizar la esquematización, se analizó la información requerida por el EPA-SWMM: principalmente datos de carácter hidráulicos y topográficos la gran mayoría suministrados por parte de EMCALI, además de estudios de consultoría adelantados por empresas como, MANOV e HIPERAGUAS (HIPERAGUAS & EMCALI, 2007; MANOV *et al.*, 2007b); los datos hidrológicos fueron suministrados por la CVC y tomados del estudio de (Forero & Franco, 2003).

Los criterios para adelantar la esquematización se basan, en la información disponible y generada por EMCALI y la metodología seguida por (Delgado & Pulido, 2005). Se conservan las aéreas tributarias del sistema de alcantarillado pluvial y sanitario.

Se realiza una esquematización general del sistema de alcantarillado, teniendo en cuenta los caudales pluviales y sanitarios, se identificaron los colectores principales; los diámetros mínimos considerados fueron: colectores pluviales y sanitarios mayores a 18" y colectores combinados mayores a 16". Para simplificación de la esquematización se representaron las redes primarias de cada subcuenca, con esto se omitieron algunas estructuras de separación y solo se incorporaron las que conectaban colectores de gran diámetro con los canales.

Se esquematizo el sistema de canales aferente a la zona, la información de las secciones fue tomada de la modelación realizada por HIPERAGUAS (HIPERAGUAS & EMCALI, 2007) y complementada con visitas de campo; los tramos del río Cañaveralejo antes de ser canalizados se representaron como secciones irregulares, las cuales fueron tomadas del estudio de la firma BEGO (Bego & EMCALI, 2009).

Además se representa un embalse existente, este se incorpora como un depósito de almacenamiento temporal, los datos se toman del estudio realizado por (MANOV *et al.*, 2007b), tanto las condiciones actuales, como para la generación de los escenarios.

La información restante para alimentar el modelo, fue tomada de los manuales del SWMM y de anteriores modelaciones realizadas en el área metropolitana de Cali. (Gironás *et al.*, 2005; Gironás *et al.*, 2010; Lockie, 2009; Rossman, 2010), como lo son: los coeficientes de rugosidad de Manning para escorrentía superficial, flujo en conductos cerrados y abiertos, valores de almacenamiento en depresiones, almacenamiento para aéreas permeable e impermeable; el coeficiente de infiltración empleado para zonas permeables fue el de Horton, los datos se tomaron del estudio realizado por (Galvis, 1986; Galvis, 1996), los cuales fueron ajustado para una zona de la ciudad de Cali. Los hietogramas y eventos de precipitación para las estaciones pluviograficas: Edificio CVC y Cañaveralejo fueron suministrados por la CVC y tomados de los estudios realizados por (Forero & Franco, 2003; HIPERAGUAS & EMCALI, 2007), al igual que los hidrogramas para la estación limnigráfica el Jardín. Los hidrogramas para los canales pluviales, fueron generados por el bloque RUNOFF, los Hi-

drogramas de agua residual fueron calculados de acuerdo a la metodología de (Delgado & Pulido, 2005) y los datos suministrado por Emcali.

7.3.2 Calibración preliminar

Se realizó una calibración preliminar del modelo, se pudo identificar en la estación el jardín un evento de precipitación el día 09 de Enero de 1999 y la respectiva respuesta de caudales. La calibración del modelo de drenaje urbano tuvo como fin tratar de obtener un mejor ajuste entre los resultados del modelo y los datos medidos.

Se realizó una revisión de literatura sobre el tema (Boughton & Droop, 2003; Castro Aragon & Carrasco Villota, 2011; Choi & Ball, 2002; Massoudieh *et al.*, 2008; Orozco & Saldarriaga, 2005), y las diferentes metodologías utilizadas para hacer la calibración, de un modelo de drenaje urbano, mediante el programa EPA SWMM 5.0. En el presente estudio se utilizó la metodología de calibración por medio de un algoritmo de optimización (Cardenas, 2008; Orozco & Saldarriaga, 2005).

Para llevar a cabo la calibración del modelo se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de encontrar la respuesta del modelo a los cambios de los parámetros permitiendo evaluar la aplicabilidad del modelo y determinar los parámetros que tiene que ser medidos con mayor exactitud, en el proceso de optimización; que consiste en minimizar o maximizar el valor de una variable mediante una función objetivo, se utilizaron algoritmos genéticos la función objetivo empleada fue al raíz del error cuadrático medio (RMSE); para lo cual se emplearon subrutinas elaboradas en estudios anteriores en el programa MATLAB por (Orozco & Saldarriaga, 2005) y (Cardenas, 2008), con el fin de llamar, correr y modificar los archivos del modelos EPA-SWMM.

7.3.3 Aplicación del modelo EPA-SWMM

Una vez realizada la calibración preliminar, se definieron los escenarios que se presentan en la Tabla 7.1. Para la representación de los SDUS, la esquematización tuvo ajustes en el área propuesta (Complejo deportivo – Coliseo del Pueblo, Plaza de Toros y Embalse Cañaveralejo) ver numeral 7.2. Los escenarios con el alcantarillado existente se nombran “sin SUDS” y los modificados “con SUDS”. Posteriormente se hace una comparación de resultados de los dos escenarios propuestos.

Tabla 7.1. Escenarios propuestos para sistema de drenaje sostenible

Escenario	Descripción
Sin SUDS	Se emplean lluvias de diseño del estudio de (Forero & Franco, 2003), correspondientes a periodos de retorno de 10, 20 y 50 años ,chequeando la respuesta del sistema de alcantarillado pluvial y observando los lugares donde ocurren los desbordamiento.
Con SUDS	En este escenario se analiza la respuesta de los SUDS en la reducción de picos de caudales, en las áreas de implementación. Se emplean los eventos de los anteriores escenarios descritos.

8. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 DIAGNÓSTICO

8.1.1 Evolución histórica

Para la realización del presente estudio se llevó a cabo un diagnóstico del área de estudio mostrando la evolución histórica de la zona y haciendo énfasis en los cambios y condiciones que afectan el sistema de alcantarillado.

Hasta mediados del siglo XX, cuando se disparó el crecimiento urbano de la ciudad asociado a fenómenos de migración interna, la zona del río Cañaveralejo, entre otras, fue evitada para asentamientos o expansión urbana por sus condiciones ambientales, sin embargo en los últimos años, el crecimiento urbanístico la ha extendido hacia terrenos más bajos, terrenos que en el pasado fueron cenagosos, inundables, con dificultad de caminos, sobre depósitos del río Cañaveralejo, y hacia terrenos pendientes, potencialmente inestables, sobre el piedemonte de la Cordillera Occidental. Fenómenos como sismos han afectado tal desarrollo urbanístico, causando daños en edificaciones de la ciudad, principalmente en éstos depósitos, de reciente urbanización (Rosales, 2001). En la Tabla 8.1 se observa un resumen de los eventos más relevantes que influyeron en los cambios urbanísticos de la cuenca del río Cañaveralejo y en las Figura 8.1 y 8.2.

Tabla 8.1. Evolución histórica de la cuenca del río Cañaveralejo

Año	Obra	Descripción
1956	Construcción de la Plaza de Toros	Se inicia la urbanización de los terrenos entre los ríos Meléndez y Cañaveralejo.
1958-1962	Construcción “proyecto Aguablanca – CVC”	Se construye el canal principal, el canal secundario y el canal Sur; la Estación de bombeo Paso del Comercio, El Jarillón Marginal al Canal Sur y al Río Cauca.
1964-1971	Canalización del Rio Cañaveralejo	Se desvía el cauce del río, por la actual carrera 50 hasta el canal interceptor CVC. Además de la construcción del Interceptor Oriental I y II, el colector Cañaveralejo y su estación de bombeo, los canales de aguas lluvia Puente Palma, entre otras obras
1972-1992	Construcción Embalse Cañaveralejo	Se construyeron las obras de la primera etapa del Plan Maestro de Alcantarillado, que contempló la construcción de troncales sanitarias y pluviales.

Fuente: (Castro, 1992; Jiménez, 2005; Rosales, 2001)

El territorio donde se lleva a cabo el presente estudio y donde este diagnóstico hace énfasis comprende un área rural y urbana, en donde la zona urbanizada es en la cual se llevan las acciones a efectuar.

La parte alta de la cuenca del río Cañaveralejo ocupa zonas en los corregimientos de los Andes, Villacarmelo y la Buitrera. El uso del suelo de acuerdo al plan de ordenamiento territorial aún vigente (POT), está dirigida por condición de zonas rurales a usos agrícola, forestales, de explotación de recursos naturales y actividades análogas como se aprecia en la Figura 8.3.

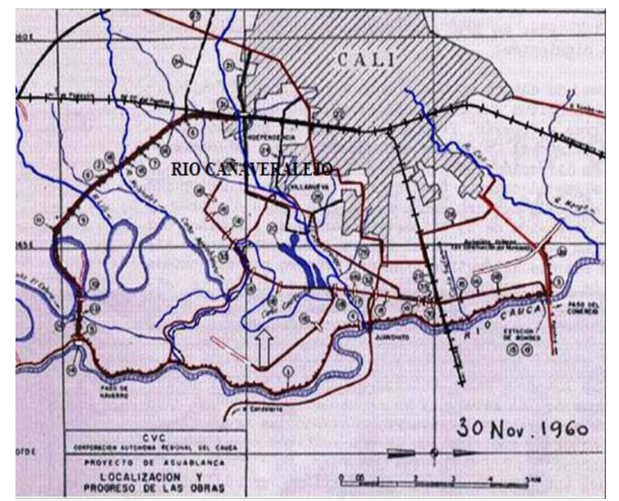


Figura 8.1. Drenaje rio Cañaveralejo antes del proyecto Aguablanca noviembre 30 de 1961.
Fuente: (CVC, 1960) citado por (Jiménez, 2005).



Figura 8.2. Crecimiento urbanístico zona aledañas al rio Cañaveralejo en 1976.
Fuente: (Oficina de Planeación Municipal, 1976)

Área (ha)
12%
10%
8%
6%
4%
2%
0%
Bn Bg Bp R P Cv Oc
AUMP
AUML
AFPr
AFPRt
AFPt
Cobertura de Suelo

CLASIFICACIÓN DE AREAS

AFPt Áreas forestales protectoras
AFPRt Áreas forestales productoras – protectoras
AFPr Áreas forestales productoras
AUM Áreas de uso múltiple
(L Zona ladera, P Zona plana)

COBERTURA DE SUELO

Bn Bosque natural
Bg Bosque guadua
Bp Bosque plantado
R Rastrojo
P¨ Pasto
Cv Cultivo varios y caña
Oc Otras Coberturas

Figura 8.3. Clasificación de áreas forestales Vs. Cobertura del suelo en la Cuenca de los ríos Lilí-Meléndez-Cañaveralejo.
Fuente: Adaptado de (CVC & Universidad del Tolima, 2008)

En la zona urbana el área de influencia del río Cañaveralejo comprende las comunas: 10, 17, 18 ,19 y 20. El uso del suelo de las comunas se presenta en el Anexo 1.

8.1.2 Descripción del sistema de alcantarillado

El sistema de alcantarillado de la ciudad, tiene tramos separados (15%) y combinados (85%); de acuerdo con las características del terreno, el alcantarillado de la ciudad lo conforman tres sistemas de drenaje: el sistema de drenaje Sur, el sistema de drenaje Este y el Sistema de drenaje Nor-OEste. Como se muestra en la Figura 8.4.

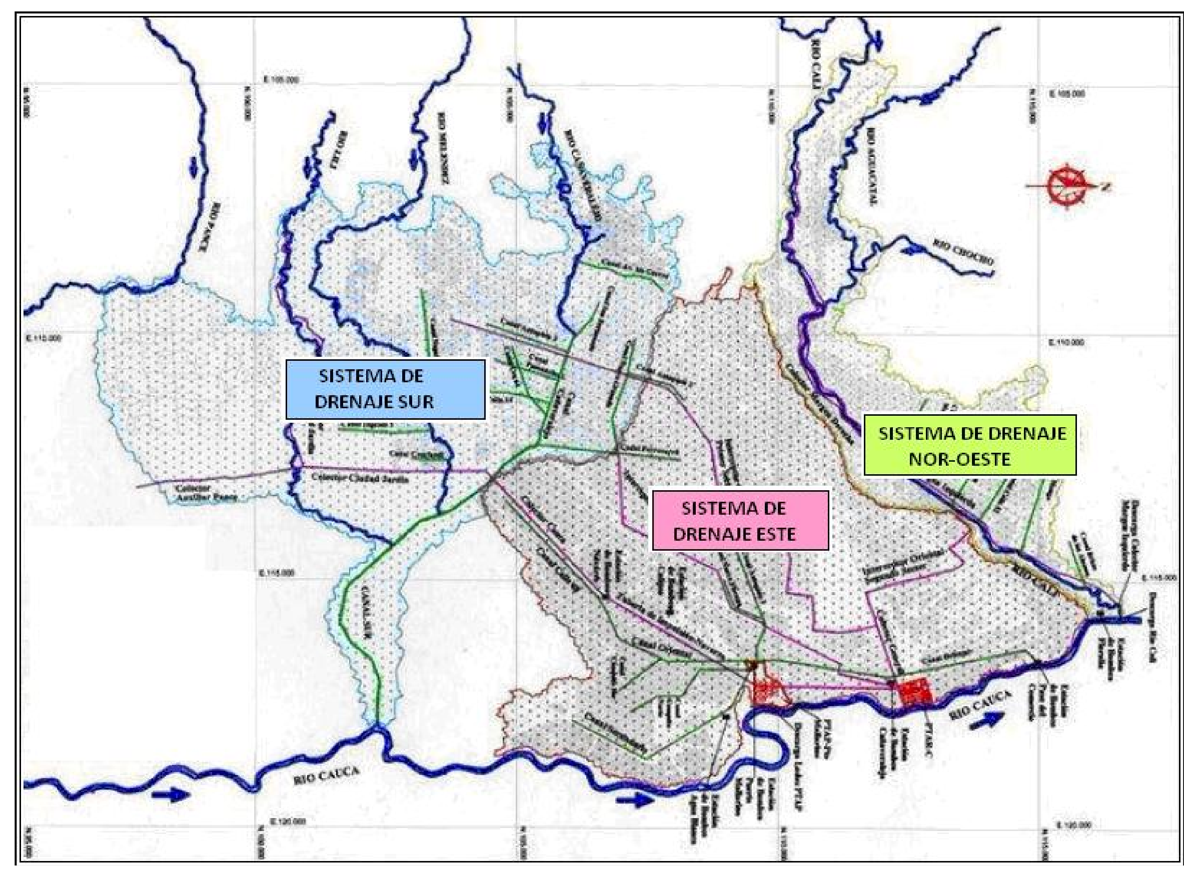


Figura 8.4. Sistema de drenaje de la ciudad de Cali.
Fuente: Adaptada de (Universidad del Valle, 2010)

La zona de estudio hace parte del sistema de drenaje Sur el cual está compuesto por el alcantarillado sanitario, alcantarillado pluvial y los ríos Cañaveralejo, Meléndez y Lili, este no posee estaciones de bombeo, todo el sistema drena por gravedad al río Cauca.

La zona de influencia comprende las comunas 9, 10, 17, 18, 19 y 20; tiene una longitud en canales de 36429 m, lo componen los subsistemas: Cañaveralejo, Ferrocarril, Meléndez – Lili y el Canal Interceptor Sur. Este se aprecia en la Figura 8.5.

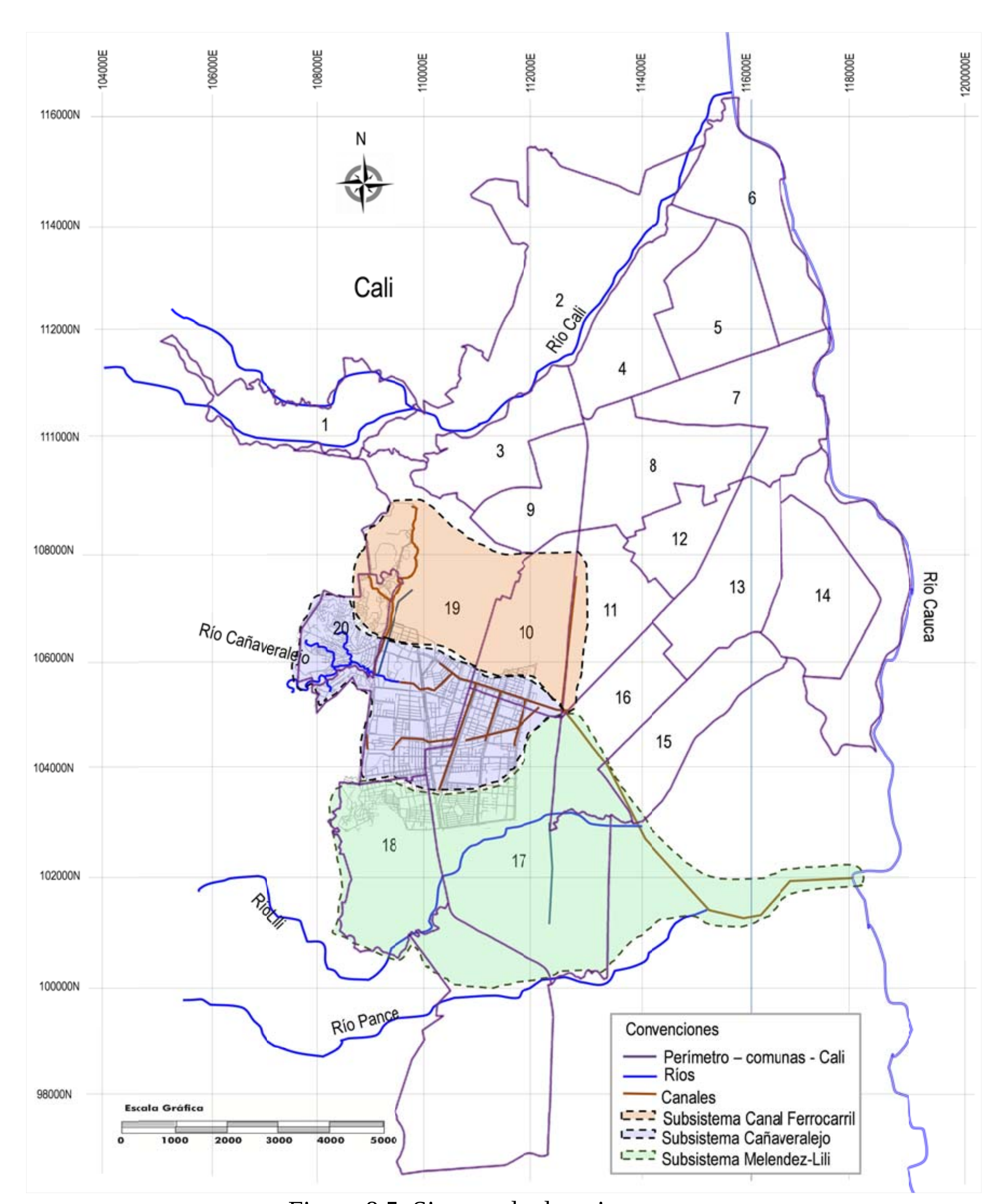


Figura 8.5. Sistema de drenaje zona sur.

El área del trabajo se centra en el subsistema Cañaveralejo, el cual está conformado por los canales: Los Cristales, Av. Los Cerros, San Fernando, Puente Palma, Autopista 3, Pasoancho 1 ó Calle 13, Calle 14, Quebrada Isabel Pérez, Quebrada Guarrús, Quebrada el Indio y Canal Cañaveralejo (Figura 8.6). Las características están consignadas en el Anexo 2.

Uno de los problemas del sistema de alcantarillado, de la ciudad de Cali, son las conexiones erradas, que en los últimos años se ha incrementado sustancialmente y con esto aumentando la problemática de las aguas residuales en los canales de agua lluvia.

- Conexiones erradas

En un estudio elaborado por el consorcio MANOV-Análisis Ambientales, para EMCALI en el año 2007, se realizó un inventario de los tramos de alcantarillado, cámaras y estructuras de separación del subsistema Cañaveralejo en el área de influencia de los canales Autopista 3, Canal Calle 14, Canal Pasoancho, Canal Puente Palma, canal Río Cañaveralejo y Canal San Fernando para detectar conexiones erradas, estructuras con mal funcionamiento, adecuar cámaras existentes a estructuras de separación, definir diseños y optimizar estructuras.



Figura 8.6. Canales Subsistema Cañaveralejo

En la investigación que se llevó a cabo por MANOV, se encontraron estructuras de separación que están dejando pasar flujo de aguas residuales al sistema de drenaje pluvial por falta de mantenimiento, cambio de condiciones hidráulicas, modificaciones realizadas, deterioro y vandalismo. El inventario de estas se encuentra en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2. Subsistema Cañaveralejo inventario y resumen del diagnóstico de estructuras de separación

Ubicación	Estructuras Sin flujo	Estructuras Con flujo	Estructuras no encontradas	Estructuras evaluadas	Total
Canal Autopista 3	1	5	2	6	8
Canal Calle 14				0	0
Canal Pasoancho 1				0	0
Canal Puente Palma		6	0	7	7
Canal Rio Cañaveralejo	2	1		3	3
Canal San Fernando	1	2		3	3
Canal Av. Los Cerros	4	1	4	4	8
Rio Cañaveralejo		1		1	1
Totales	8	17	6	24	30

Fuente:(EMCALI, 2007)

8.1.3 Embalse Cañaveralejo

El subsistema Cañaveralejo cuenta con un embalse (Figura 8.7) de regulación artificial construido para amortiguar los picos de caudales que se presentan en épocas de invierno en el río Cañaveralejo y así evitar inundación en zonas aledañas.

Desde su construcción en 1972, hasta la actualidad EMCALI, ha contratado diferentes estudios técnicos para la optimización del embalse Cañaveralejo. de las cuales se han adelantado algunas obras de adecuación, dirigidas a corregir las conexiones erradas, recomendadas por el estudio de (MANOV *et al.*, 2007a). En la Tabla 8.3 se observan las características del embalse Cañaveralejo para 1968.

En cuanto al mejoramiento hidráulico, no se han llevado a cabo ninguna obra dirigida a optimizar el embalse, este se encuentra sedimentado. La estructura de salida no posee una compuerta que regule el caudal; por ende en los eventos de alta precipitación este no tiene una buena respuesta para amortiguar el pico de caudal, lo cual agrava el problema de inundación aguas abajo. Como se aprecia en la Figura 8.8.



Figura 8.7. Embalse Cañaveralejo.
Fuente: Adaptado de (Google, 2011)



Figura 8.8. Embalse Cañaveralejo situación Actual

Tabla 8.3. Características del embalse Cañaveralejo para el año 1968.

Elemento de diseño	Unidad	Valor
Área tributaria	ha	1500
Volumen del embalse	m^3	109000
Elevación fondo embalse	m.s.n.m.	985,05
Nivel de agua para Tr = 5 años	m.s.n.m.	987,07
Nivel de agua para Tr mayores	m.s.n.m.	988,76
Pico del hidrograma	m^3/s	31,4
Duración del hidrograma	horas	2,7
Volumen del hidrograma	m^3	139850
Caudal derivado por el canal Nápoles	m^3/s	5,4
Caudal derivado por el canal Cañaveralejo	m^3/s	4,4
Capacidad máxima del canal Napoles	m^3/s	19,2

Fuente: (MANOV *et al.*, 2007a)

8.1.4 Inundaciones

El río Cañaveralejo, se caracteriza por tener crecidas súbitas en eventos de lluvias, esto se debe por ser un río de montaña, tener pendientes pronunciadas, por el deterioro de la capa vegetal y la erosión que presenta los suelos de la parte alta de la cuenca.

La parte baja de la cuenca se encuentra totalmente consolidad, por ello el sistema de alcantarillado pluvial diseñado originalmente para la zona es insuficiente y colapsa. Los eventos de desbordamiento ocasionados por avenidas torrenciales en los últimos años se han presentado con mayor frecuencia en los meses de abril y noviembre; como los registrados entre el 2003 y el 2011, esto se debe a que cada vez las lluvias son más intensas y de mayor duración.

El río Cañaveralejo se desborda a su paso por el Coliseo del Pueblo (calle 3 con carrera 56), en el centro comercial Palmetto Plaza (calle 9 con carrera 50), Estos eventos ocurren por empalizadas sobre los puentes que se encuentran sobre este. Además represa sus tributarios como es el caso del Canal Autopista 3, causando desbordamiento en la calle 10 con carrera 50, al igual que en los cruces de la calle 13 y 14 con carrera 50. Como se puede evidenciar en la Figura 8.9, del evento ocurrido el 08 de Noviembre del año 2011.

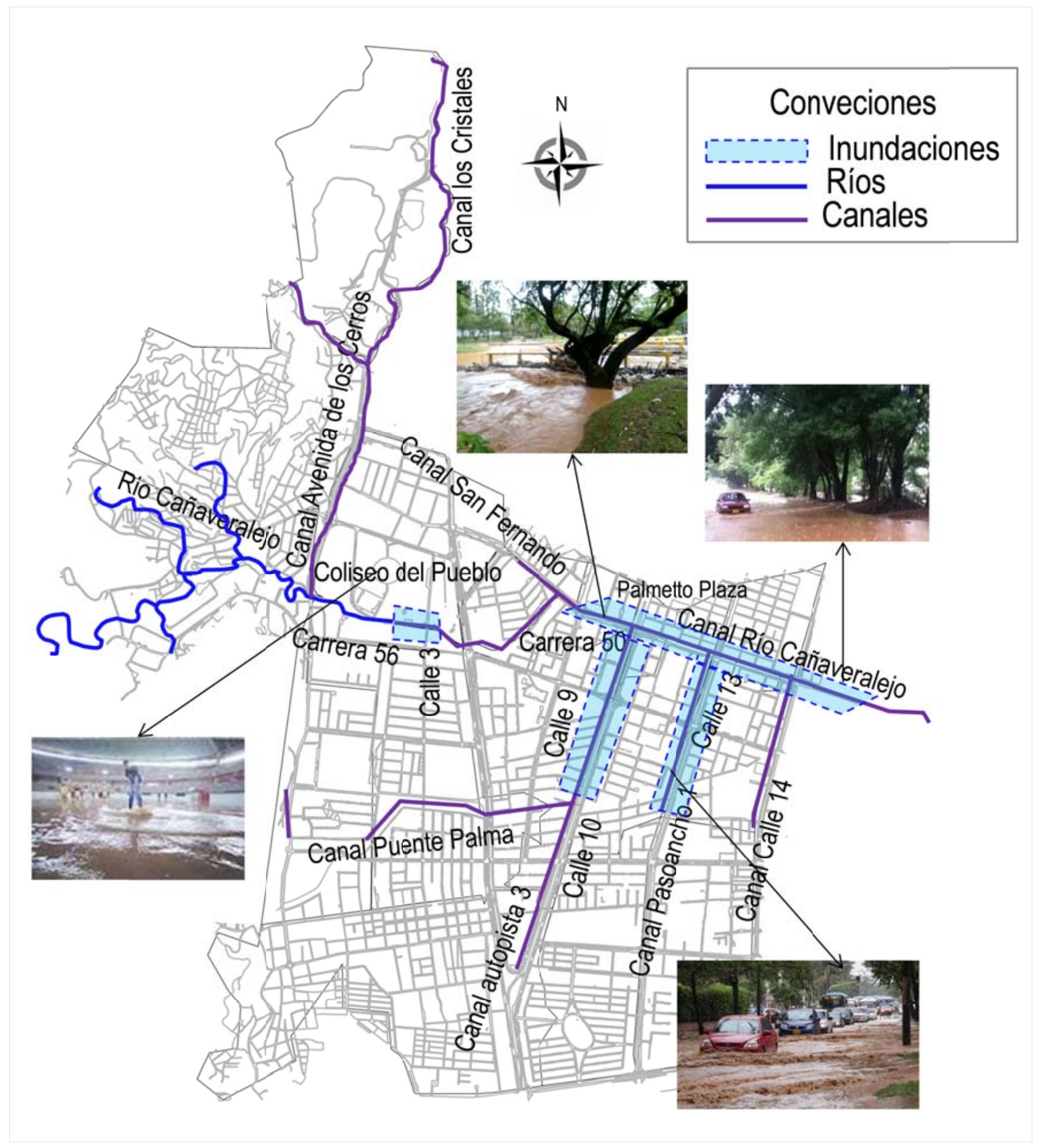


Figura 8.9. Zonas de desbordamiento, de la cuenca urbana del río Cañaveralejo.
Fuente: Adaptado de (CVC, 2011; Diario El País, 2008,2009,2010,2011)

8.2 ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE DRENAJE SOSTENIBLES

Dentro de las Técnicas SUDS existen una gran variedad de estas que pueden ser utilizadas en un mismo sitio, cada sitio tiene características únicas, las cuales deben guiar la selección del conjunto de alternativas SUDS más adecuado.

Los criterios de selección básicos de los SUDS según el Manual de (CIRIA, 2007) son:

- Uso del Suelo.
- Las Características del Lugar
- Características de la cuenca.
- Requerimientos de tratamiento en cuanto a calidad y cantidad.
- Requerimientos ambientales, sociales y económicos

Se analizó y estudio, cada uno de los anteriores criterios, para escoger el lugar, más idóneo dentro de la zona de estudio. Buscando espacios amplios, propiedad del municipio y con una ubicación que permita el manejo de la escorrentía en el origen y la gestión de la misma, mitigando los problemas asociados a esta, tanto en calidad y en mayor proporción en cantidad.

En el diagnóstico de la zona, en particular del sistema de alcantarillado pluvial se observa la existencia de un embalse de regulación de caudales a la entrada del área urbana, el embalse Cañaveralejo, el cual no tiene un funcionamiento óptimo. Por su ubicación dentro de la cuenca y capacidad para regular grandes caudales se escoge como una de las alternativas para implementar los SUDS.

Otras de las zonas detectadas dentro del diagnóstico es el complejo deportivo (Coliseo del Pueblo – Velódromo Alcides Nieto Patiño), es un espacio público, con zonas verdes y áreas grandes; por los cual se considera con un alto potencial para el aprovechamiento de técnicas SUDS. De igual manera se observó la amplia zona de parqueaderos que tiene la Plaza de Toros Cañaveralejo, previo contiguo al Coliseo del pueblo, en los cuales se pueden implementar unas de las opciones SUDS, para el control de escorrentía y contaminación de la misma. En la Figura 8.10 y 8.11, se muestra la zona propuesta para la implementación de los SDUS, dentro de área de estudio.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se adapta una matriz de selección de SUDS siguiendo la metodología propuesta por (CIRIA, 2007), en donde se hizo un análisis para seleccionar las opciones más adecuadas, teniendo en cuenta criterios, del uso del suelo, Características del suelo, área de drenaje aferente, Nivel freático, remoción de contaminación, reducción del volumen de escorrentía, mantenimiento, costo y potencial de espacios para uso recreativo. La matriz de selección de SUDS se observa en la Tabla 8.4.

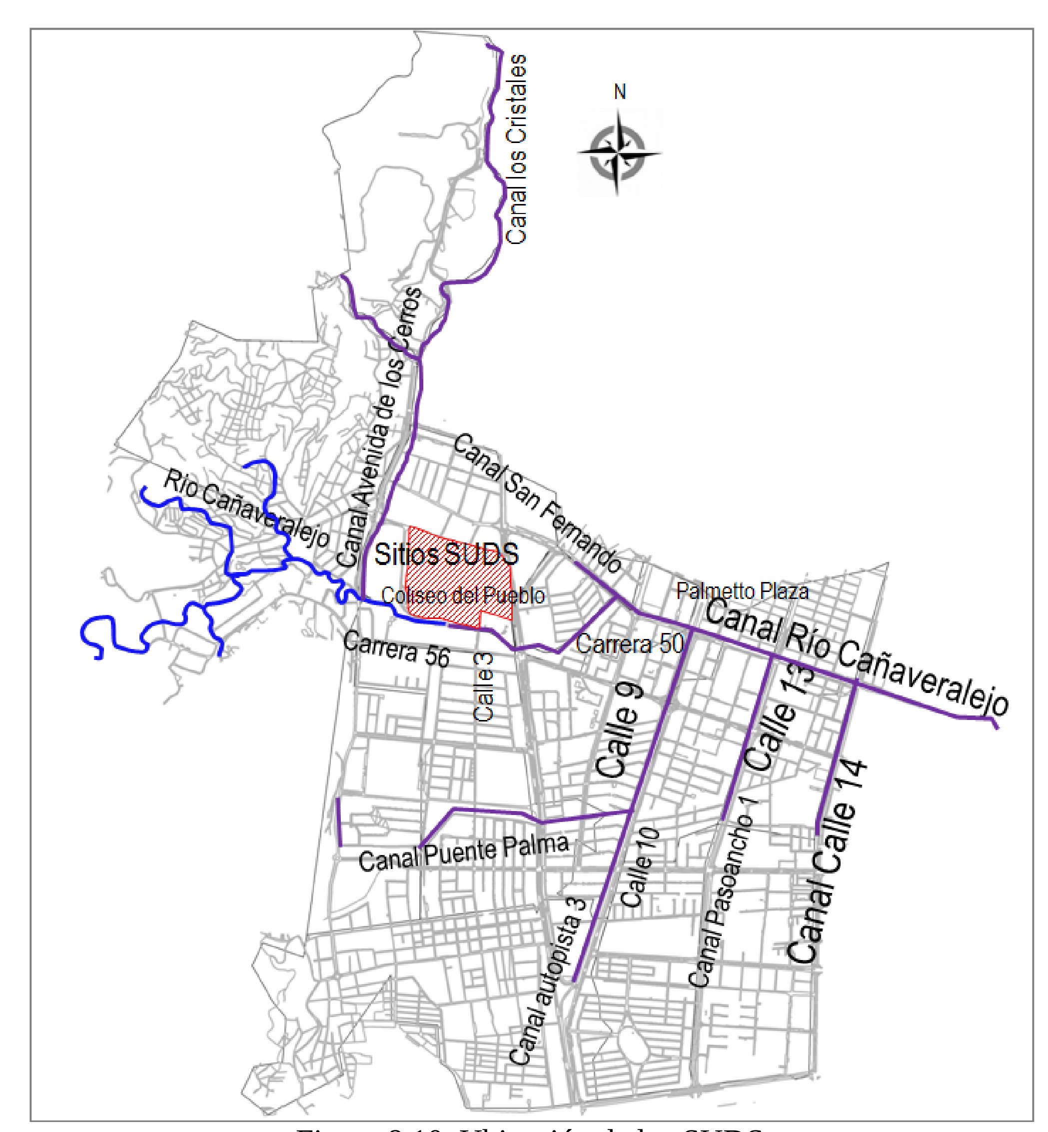


Figura 8.10. Ubicación de los SUDS



Figura 8.11 Zona de Implementación de lo SUDS

Tabla 8.4. Matriz de selección de SUDS

Grupos de SUDS	Técnica	Uso del Suelo				Características del Suelo		Área de drenaje para un componente SUDS sencillo		Profundidad mínima del nivel freático		Tratamiento de la calidad del agua (potencial)		Control Hidráulico				Mantenimiento	Costo	Hábitat -recreación (Potencial)
														Reducción de volumen de escorrentía	Control del caudal (periodo de re-torno)					
		Baja densidad	Residencial	Carreteras locales	Comercial	Impermeable	Permeable	0-2 ha	> 2 ha	0 – 1m	1m	Remoción de sólidos suspendidos totales	Remoción de metales pesados		0,5 (1/2 años)	0,1-0.3 (10/30 años)	0,01 (100 años)			
Retención	Estanques de Retención	S	S	S1	S2	S	S3	S	S6	S	S	A	M	B	A	A	A	M	M	A
	Almacenamiento sub superficial	S	S	S	S	S	S	S	S6	S	S	B	L	B	A	A	A	B	M	B
Humedales	Humedales poco profundos	S	S	S1	S2	S4	S5	S5	S7	S4	S4	A	M	B	A	M	B	A	A	A
	Retención extendida en humedales	S	S	S1	S2	S4	S5	S5	S7	S4	S4	A	M	B	A	M	B	A	A	A
	Estanque / humedal	S	S	S1	S2	S4	S5	S5	S7	S4	S4	A	M	B	A	M	B	A	A	A
	Humedales pequeños	S	S	S1	S2	S4	S5	S5	N	S4	S4	A	M	B	A	M	B	A	A	A
	Humedal de grava sumergida	S	S	S1	S2	S4	S5	S5	S7	S4	S4	A	M	B	A	M	B	M	A	M
	humedales - canal	S	S	S1	S2	S4	S5	S5	S7	S4	S4	A	M	B	A	M	B	A	A	A
Infiltración	Zanjas de infiltración	S	S	S1	S2	N	S	S	N	N	S	A	A	A	A	A	B	B	B	B
	Depósitos de infiltración	S	S	S1	S2	N	S	S	S6	N	S	A	A	A	A	A	A	M	B	M
	Pozo	S	S	S1	S2	N	S	S	N	N	S	A	A	A	A	A	B	B	M	B
Filtración	Filtros en arena superficial	N	S	S1	S2	S	S	S	S6	N	S	A	A	B	A	M	B	M	A	M
	Filtros en arena sub superficial	N	S	S1	S2	S	S	S	N	N	S	A	A	B	A	M	B	M	A	B
	Filtro en arena perimetrales	N	N	S1	S2	S	S	S	N	N	S	A	A	B	A	M	B	M	A	B
	Bio-retención / Franjas Filtrantes	S	S	S1	S2	S	S	S	N	N	S	A	A	B	A	M	B	A	M	A
	Zanja filtrante	S	S	S1	S2	S	S3	S	N	N	S	A	A	B	A	A	B	M	M	B
Detención	Depósitos de Detención	S	S	S1	S2	S	S3	S	S6	N	S	M	M	B	A	A	A	B	B	M
Canales Abiertos	Cunetas	S	S	S1	S2	S	S	S	N	N	S	A	M	M	A	A	A	B	B	M
	Cunetas secas mejoradas	S	S	S1	S2	S	S	S	N	N	S	A	A	M	A	A	A	B	M	M
	Cunetas húmedas mejoradas	S	S	S1	S2	S4	S5	S	N	S	S	A	A	B	A	A	A	M	M	A
Control en la fuente	Techo verde	S	S	N	S2	S	S	S	N	S	S	n/a	n/a	A	A	A	B	A	A	A
	Recolección de agua lluvia	S	S	N	S2	S	S	S	N	S	S	M	B	M	M	A	B	A	A	B
	Pavimentos permeables	S	S	N	S2	S	S	S	S	N	S	A	A	A	A	A	B	M	M	B

Convenciones: ***S****= si* ***N****= no* ***n/a****= no aplica* ***A****= alto* ***M****= medio* ***B****= bajo*

1 *= Puede requerir dos etapas de tratamiento dependiendo del tipo de vía.* **2** *= Puede requerir tres tratamiento dependiendo del grado de sensibilidad del cuerpo receptor de agua.*
3 *= Con revestimiento* ***4*** *= Con flujo base superficial.* ***5*** *= Con revestimiento y flujo base superficial constante o nivel freático alto* ***6*** *= Posible pero no recomendable (implica un manejo apropiado)* ***7*** *= Donde los caudales altos son separados alrededor de los componentes de los SUDS*

Fuente: Adaptada de (CIRIA, 2007).

Las técnicas SUDS seleccionadas se muestran en la Tabla 8.5.

Tabla 8.5. Técnicas SUDS seleccionadas

Grupo de SUDS	Técnica	Criterio a destacar
Filtración	Biorreten	➢ a, b, c, d, e, l
Detención	Depósito de detención	➢ a, c, f, g, h, i, j
Control en la fuente	Pavimento permeable	➢ a, b, c, d, g, h, k, l,

a: Uso residencial **b**: permeable **c**: profanidad del nivel freático **d**: remoción SST **e**: Hábitat y recreación **f**: Densidad baja **g**: > 2 ha h: control hidráulico **i:** mantenimiento **j**: Costo **k**: residencial **l**: remoción metales

Según (Cereve *et al.*, 2010; DayWater, 2005) los porcentajes de remoción de contaminantes de los SUDS seleccionados son:

- Depósito de detención: 60% SST y 50% de metales
- Pavimentos permeables: 80% SST
- Biorrentenes: 10% - 40% SST y 70% - 80% metales

8.2.1 Alternativa de depósitos de detención superficiales y bioretenes

De la revisión de literatura y las experiencias internacionales se observa la doble utilización de los escenarios deportivos, como es el caso de los campos de futbol, tanto para uso recreativo como dispositivos de almacenamiento superficial.

Es por ello que surge la idea de emplear las dos canchas de futbol ubicadas en el complejo deportivo del Coliseo Pueblo, como depósitos de detención superficial, con propiedades de bioreten para mejor la capacidad de infiltración del terreno. Para controlar la escorrentía generada por las cubiertas del Coliseo del Pueblo y el Velódromo Alcides Nieto Patiño, evitando que esta llegue directamente al alcantarillado pluvial de la zona, para disminuir los picos de caudal aguas abajo. En cuanto al nivel freático uno de los limitantes al emplear este tipo de sistemas, no es un inconveniente, según la investigación de (Rosales, 2001), la profundidad de este, está en promedio entre 2 y 4 metros en la zona de estudio. El área de drenaje calculada es de 2,03 ha. Los costos de operación y mantenimiento se consideran bajos, ya que no requiere de maquinaria pesada para sus labores, se concentran en la poda del prado, el retiro de residuos sólidos y sedimentos para evitar la colmatación del medio filtrante.

8.2.2 Alternativa de pavimentos permeables

El empleo de pavimentos porosos en algunos países del mundo como España, el Reino Unido, Estados Unidos entre otros, se ha convertido en una estrategia para mejorar y controlar la escorrentía superficial. Los parqueaderos son los lugares más utilizados para implementar los pavimentos porosos. La zona de parqueaderos de la Plaza de Toros se considera un buen lugar para aplicar los pavimentos porosos, de acuerdo a los criterios de selección de la Tabla 8.4; los cuales se encuentran sobre saltados. Guiado por el estudio de

(Hernández, 2008), se escogen, bloques impermeables con juntas permeables para infiltrar la escorrentía generada. Se plantea la alternativa de deprimir el terreno 10 centímetros para aprovechar el área como almacenamiento transitorio, combinando los pavimentos permeables con los depósitos de detención superficial. El área del parqueadero es de 3.2 ha. En cuanto a la los cotos de operación y el mantenimiento son moderados, pero estos se pueden disminuir si se emplea un régimen de barrido periódico, para evitar la colmatación del medio filtrante.

8.3 PROPUESTA DE SISTEMAS DE DRENAJE SOSTENIBLES

En la propuesta de los sistemas de drenaje sostenible, se evalúan las alternativas SUDS seleccionadas, mediante la modelación de estas, considerando diferentes escenarios para la zona de estudio, detallando las características de los SUDS seleccionados. En la implementación del modelo se realiza una abstracción de área de estudio la cual es esquematizada, a continuación se observan los resultados de esta.

8.3.1 Esquematización del sistema de drenaje

La esquematización del sistema de drenaje de la cuenca del río Cañaveralejo dio como resultado una red de 34 subcuencas de drenaje, 101 nodos, 104 tramos y 3 estaciones (Figura 8.12). Seis subáreas de drenaje se ubican en la cuenca alta - media y veinte cuatro en la zona baja. El sistema de alcantarillado esquematizado comprende canales, colectores pluviales, sanitarios y combinados, los datos de la esquematización se presentan en el Anexo 3.

8.3.2 Calibración preliminar

Los resultados de la calibración fueron evaluados a la salida del embalse Cañaveralejo, con los registros obtenidos de la estación limnigráfica el Jardín, del evento de precipitación del día nueve de enero de 1999, con su respectiva respuesta de caudal.

Como se mencionó en el numeral 7.3.2, se realizó un análisis de sensibilidad, en donde el caudal respecto al porcentaje del área impermeables de la cuenca (% imperv) y el caudal con respeto a la rugosidad (Roughness), son los parámetros que varían con la menor modificación los resultados de la modelación; en las Figuras 8.13 y 8.14 se observan los resultados del análisis de sensibilidad para los dos parámetros antes mencionados.

En la Figura 8.13 se puede observar que el parámetro del porcentaje del área impermeable de la cuenca tiene gran incidencia sobre el caudal y se deduce que a mayor porcentaje el modelo reproduce caudales mayores. La Figura 8.14 presenta el análisis de sensibilidad de la rugosidad y su efecto sobre el caudal, los rangos de valores de la rugosidad entre 0.035 y 0.055 corresponden a los asignados al río Cañaveralejo y entre 0.013 y 0.030 a los rangos de valores asignados a canales y tuberías. Se observa el efecto que tiene la rugosidad sobre el caudal.

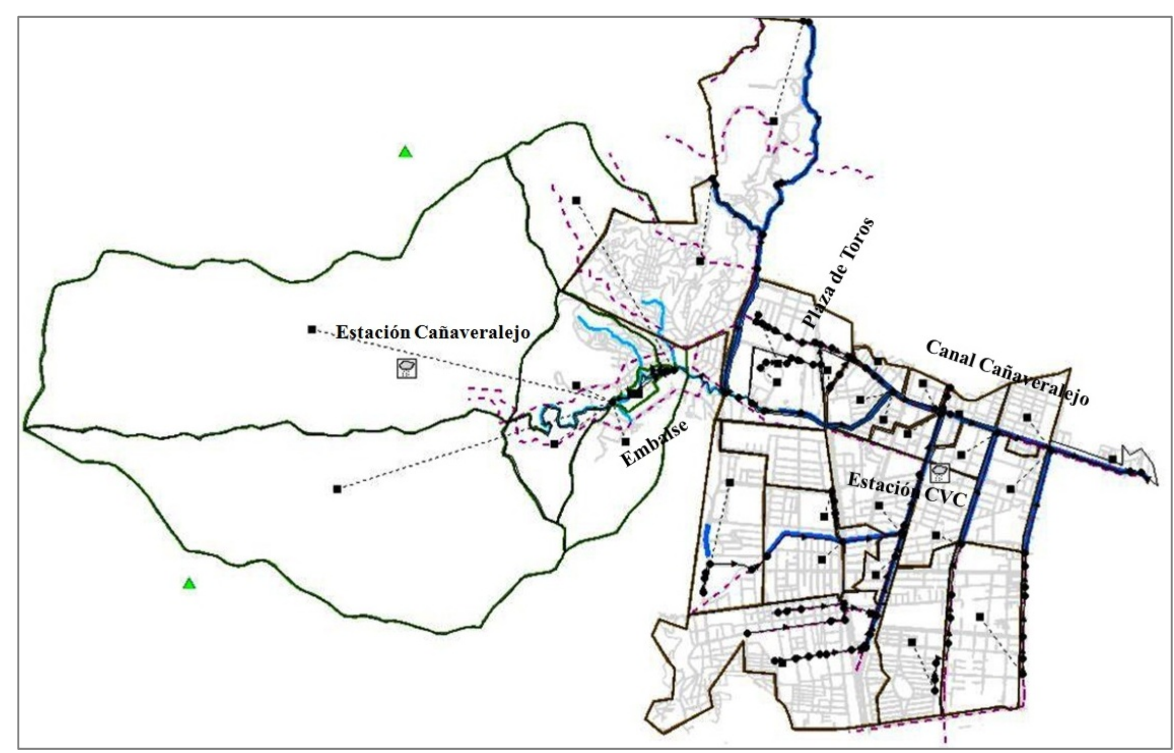


Figura 8.12. Esquematización del sistema de drenaje de la cuenca del río Cañaveralejo representado por el modelo EPA-SWMM 5.0

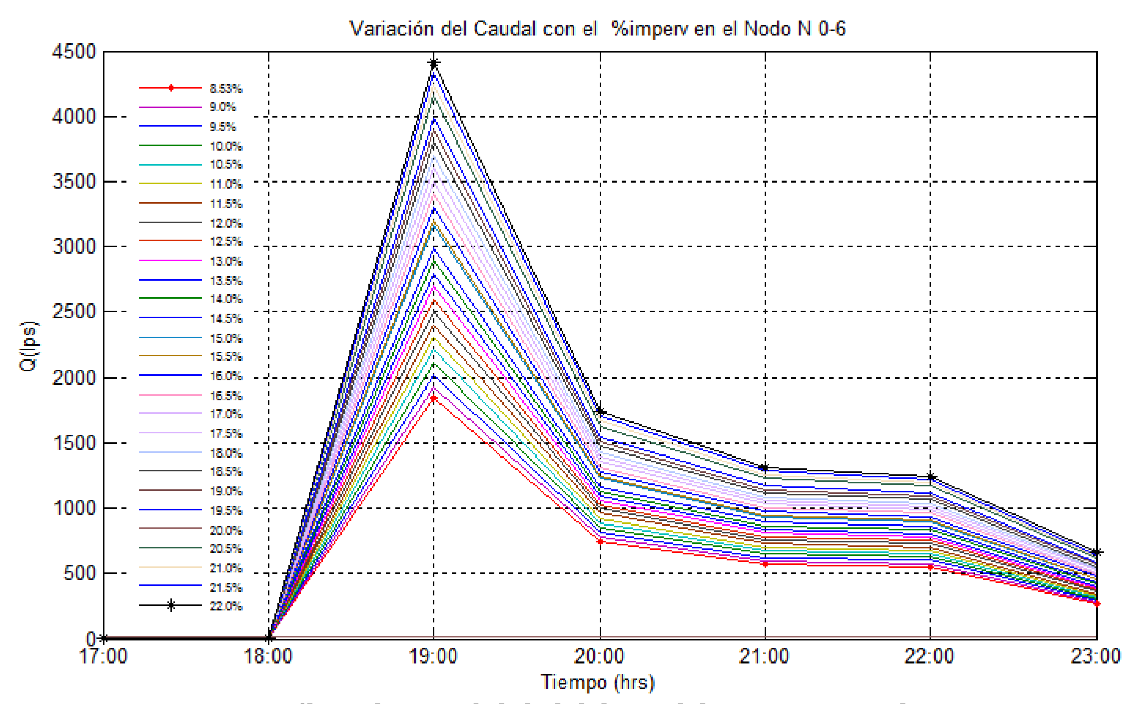


Figura 8.13. Análisis de Sensibilidad del Caudal con respecto al % Imperv

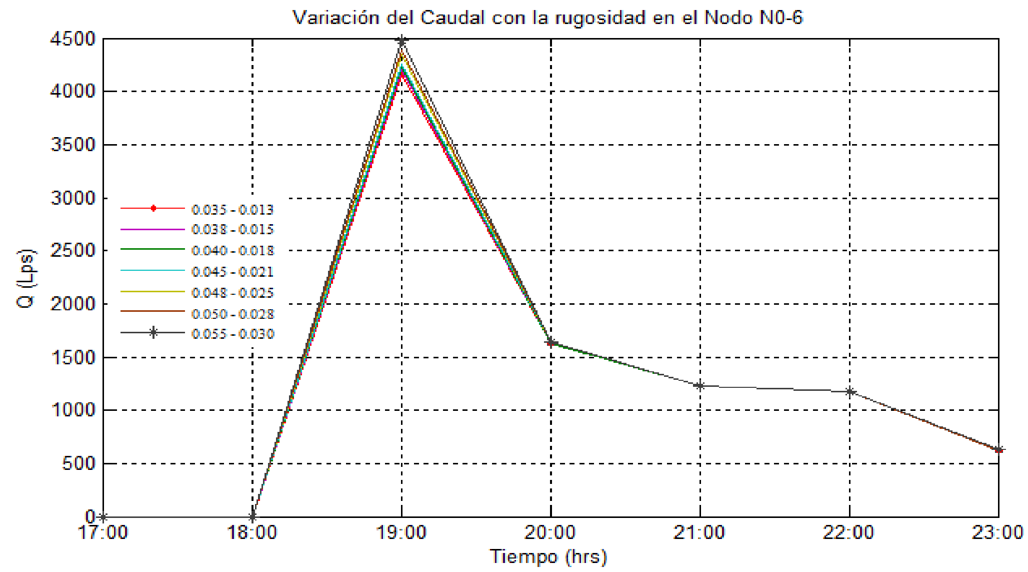


Figura 8.14. Análisis de Sensibilidad del Caudal con respecto a la rugosidad

Con los resultados del análisis de sensibilidad se procedió a la calibración del modelo con algoritmos genéticos, los parámetros óptimos de calibración se obtuvieron de acuerdo al número determinado de poblaciones, generaciones y a la opción de mutación y cruzamiento.

Los resultados del algoritmo genético muestran que para el caso de la cuenca del río Cañaveralejo no existe mayor variación en el ajuste al trabajar con más de 20 poblaciones (ajuste=1.2634). Las generaciones especifican el máximo número de iteraciones que ejecuta el algoritmo genético (criterio de finalización). La variación del ajuste de acuerdo al número de generaciones se presenta en la Figura 8.15 concluyendo que el máximo ajuste se estabiliza en la generación 200.

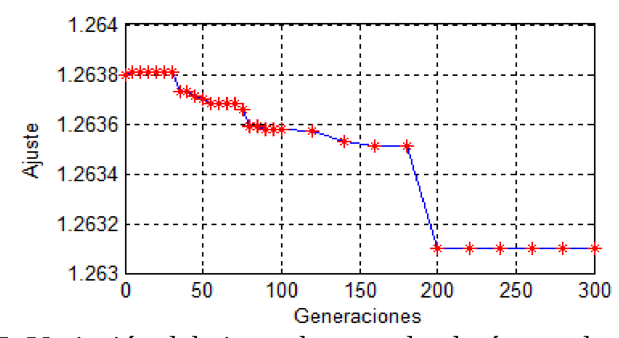


Figura 8.15. Variación del ajuste de acuerdo al número de generaciones

Los valores de los parámetros de calibración de la cuenca alta del río Cañaveralejo se presentan en la Tabla 8.6. Como todas las subcuencas esquematizadas no poseen la misma área, ancho y pendiente por las condiciones topográficas y la zona de drenaje, se construye un valor de corrección para estos; los demás valores son homogéneos para toda las subáreas. Los valores de los parámetros de calibración se encuentran en Anexo 4.

Tabla 8.6. Valores de los parámetros de calibración para la cuenca del río Cañaveralejo

Parámetro	Ajuste
Ancho de la cuenca:	0,961* W $_{subcuenca\ i}$
Pendiente de la cuenca:	1.096* S $_{subcuenca\ i}$
Porcentaje del área impermeable de la cuenca:	2.407*I $_{subcuenca\ i}$
Profundidad de almacenamiento para zonas impermeables:	2,0 mm
Profundidad de almacenamiento para zonas permeables:	7,5 mm
Porcentaje de suelo impermeable que no presenta almacenamiento en depresión:	25%
Rugosidad de la zona impermeable:	0,010
Rugosidade la zona permeable:	0,15
Constante de decaimiento del índice de infiltración - Horton:	15 mm/h
Tasa máxima de infiltración en la curva de Horton:	125mm/h
Tasa mínima de infiltración en la curva de Horton:	30 mm/h
Coeficiente de rugosidad (n) de Manning Río	0,035
Canal:	0,013

Gráficamente se puede observar la calibración, la Figura 8.16 presenta los resultados obtenidos de caudal simulado vs caudal observado para el período modelado, el coeficiente de correlación R^2 obtenido fue de 0.95, como el coeficiente está próximo a 1 la correlación es buena. La Figura 8.16 también presenta las bandas de confianza del modelo de 5% y 95%, estas bandas representan los sectores donde es más probable que se dé la respuesta del modelo, también permiten cuantificar la confiabilidad de las predicciones y representan la influencia de la incertidumbre en las magnitudes de los parámetros de calibración.

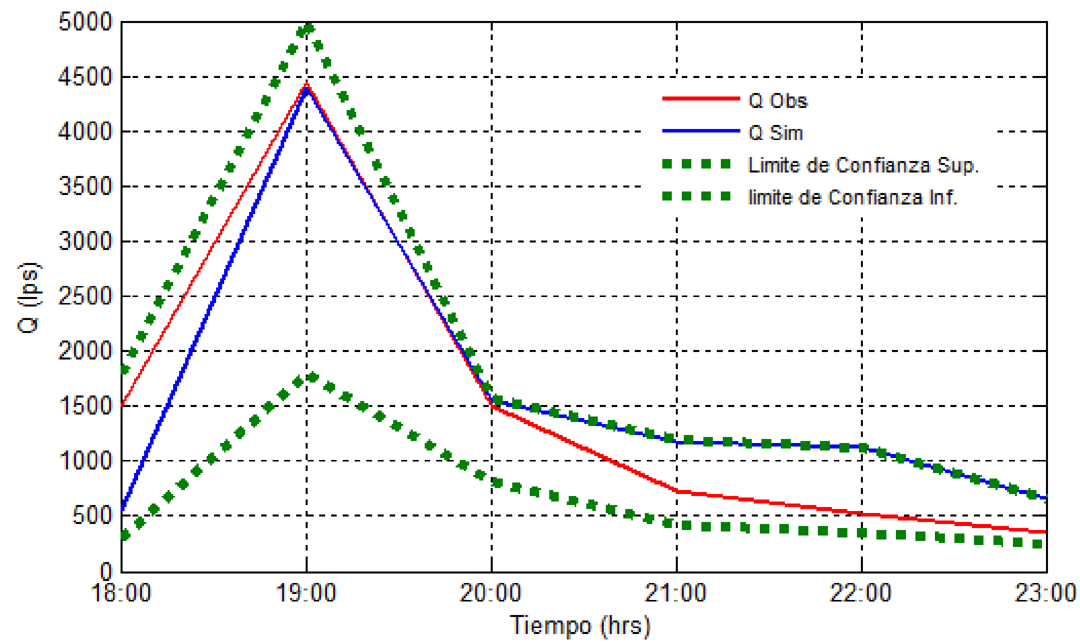


Figura 8.16. Calibración de la componente de cantidad al modelo SWMM en la cuenca alta del río Cañaveralejo (nodo N0-6) y banda de confianza de modelación.

8.3.3 Aplicación del modelo EPA-SWMM

La aplicación del modelo EPA-SWMM en el sistema de alcantarillado de la cuenca del río Cañaveralejo, se efectúa para los dos escenarios mencionados en la Tabla 7.1. En el primer escenario se modela el sistema de alcantarillado existente y se observa la respuesta de este para tres lluvias de diseño, asociadas a periodos de retorno de 10, 20 y 50 años, para observar los lugares donde el sistema se desborda. El segundo, es el escenario con SUDS, donde. Se implementan las técnicas SUDS, en el área establecida como se observa en la Figura 8.10. Posteriormente se realiza una comparación con los resultados de los dos escenarios mencionados.

- *Escenario sin SUDS asociados a lluvias con periodos de retornos de 10, 20 y 50 años.*

En este escenario se modela el embalse Cañaveralejo para su capacidad actual. Los datos y sección equivalente se muestran en la Tabla 8.7 y Figura 8.18. Se encontró que el embalse Cañaveralejo opera inadecuadamente, pues se alcanza la cota de desbordamiento y se sobre pasa 0,50 m para un evento lluvia asociada a un periodo de retorno de 10 años, como se muestra en la Figura 8.17. Una de las zonas de desbordamiento del río Cañaveralejo es carrera 55ª con calle 2 (nodo N0-8). Como se observa en la vista en planta y el perfil hidráulico de la Figura 8.19. En consecuencia el sistema también resultará insuficiente para periodos de retornos mayores (20 y 50 años).

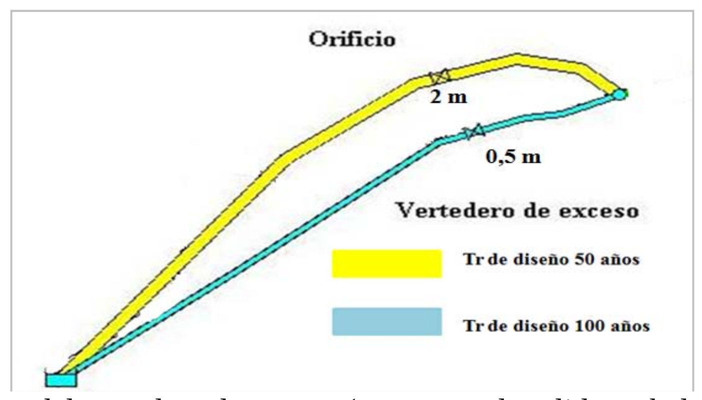


Figura 8.17. Rebose del vertedero de exceso (estructura de salida embalse Cañaveralejo Tr =10 años)

Tabla 8.7. Datos nivel vs área embalse Cañaveralejo estado actual

Nivel (m)	Área (m2)	Nivel (m)	Área (m2)	Nivel (m)	Área (m2)
0,00	501,57	1,25	27388,73	2,50	61549,07
0,25	5634,86	1,50	33300,82	2,75	68122,31
0,50	10041,28	1,75	42045,75	3,00	73448,81
0,75	1511,.43	2,00	48349,23	3,25	76706,95
1,00	20847,44	2,25	54864,12	3,50	79225,72

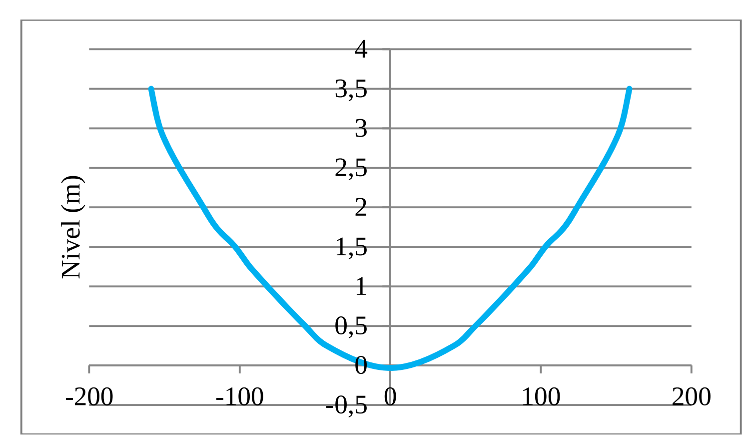


Figura 8.18. Sección equivalente de embalse Cañaveralejo estado actual

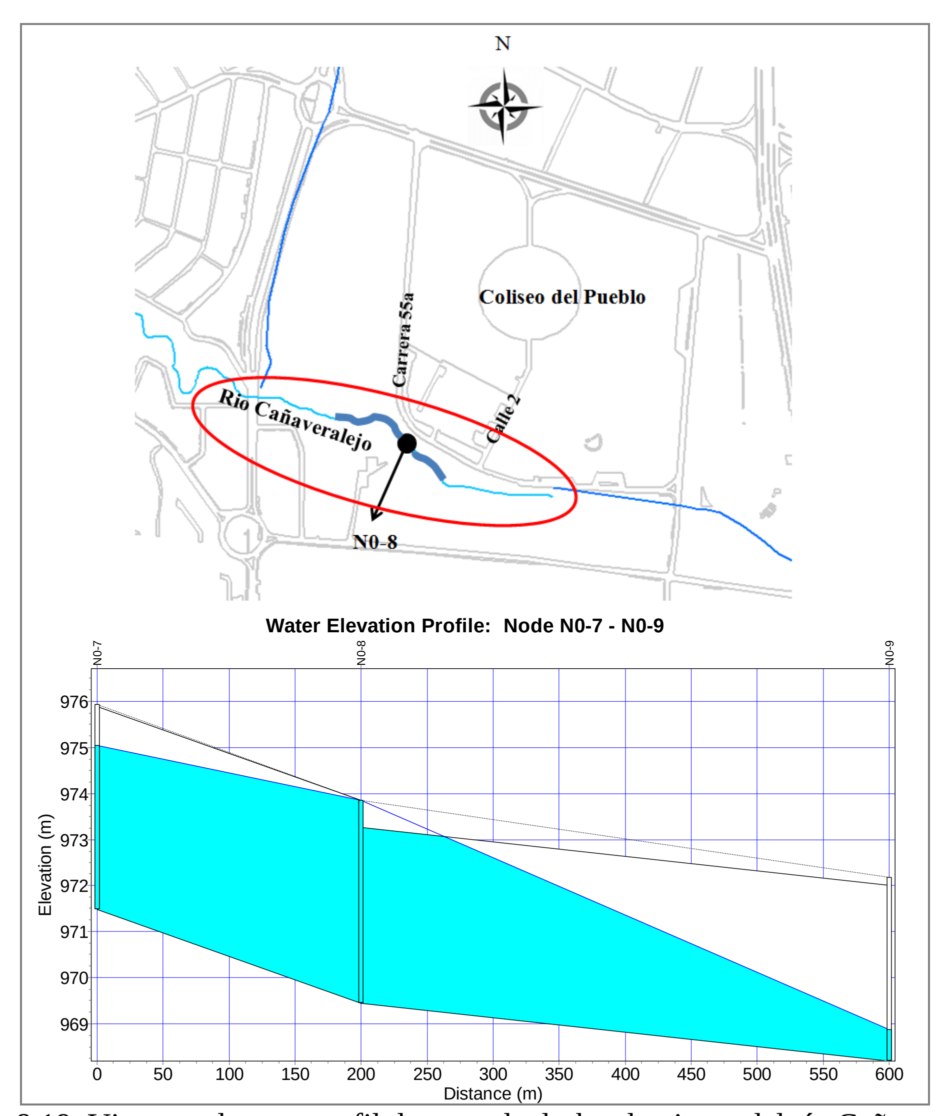


Figura 8.19. Vista en planta y perfil de zona de desbordamiento del río Cañaveralejo

El comportamiento hidráulico de los canales del área de estudio sin SUDS, para una lluvia de 10 años, se detalla en la Tabla 8.8.

Tabla 8.8. Comportamiento de los canales pluviales - Escenario sin SUDS, Tr = 10 años

Canales	Desborda	Represa	Contraflujo	Observaciones
Los Cristales	No	Si	No	El canal Av de los Cerros en el nodo (N1-7) represa al canal los cristales que entrega, sobre la carrera 39ª con Av. Circunvalar del sur.
Av. de los Cerros.	No	Si	No	El río Cañaveralejo en el nodo N1-10 represa al canal AV. De los Cerros que entrega, sobre la carrera 5ª con Av. Circunvalar del sur. El box culvert del N1-9 a N1-10 trabaja a presión.
Rio Cañave-ralejo	Si	Si	No	El canal río Cañaveralejo se desborda en el nodo N1-15, en el puente de la carrera 50 con calle 10, el box culvert de N1-15 a N1-24 trabaja a presión.
Puente Palma	No	Si	No	El canal Autopista 3 en el nodo N1-22 represa al canal que entrega, sobre la carrea 64 con calle 10.
Autopista 3	Si	Si	No	El canal Autopista 3 se desborda en el nodo N1-23 al entregar al canal río Cañaveralejo, sobre la Autopista sur con carrera 50.
Pasoancho 1	No	Si	Si	El Canal río Cañaveralejo en el nodo N1-26 represa al canal Pasoancho 1, sobre la carrera 50 con calle 13. y ocasiona contraflujo.
Calle 14	No	Si	No	El Canal río Cañaveralejo en el nodo N1-28 represa al canal calle 14, sobre la carrera 50 con calle 14.

En la Figura 8.20 se observa la vista en planta y el perfil, de la zona de desbordamiento del canal Cañaveralejo a la altura de la Carrera 50 entre calle 9 y 10, además se muestra en la Figura 8.21 la vista en planta y perfil, del desbordamiento y represamiento del canal Autopista 3 ocasionado por el canal río Cañaveralejo a la altura del cruce de la Autopista Sur Oriental con carrera 50, para una lluvia asociada a un periodo de retorno de 10 años, siendo insuficiente para eventos mayores (20 y 50 años). Confirmando lo que ocurre en la zona cada vez que hay eventos de precipitación moderados a fuertes.

En la Tabla 8.9 se observa el comportamiento hidráulico de los colectores pluviales, combinados y sanitarios de la zona de estudio, para un periodo de retorno de 10 años.

Tabla 8.9. Comportamiento de los colectores - Escenario sin SUDS, Tr = 10 años

Colectores	Desborda	Represa	Sobrecarga	Observaciones
Pluvial "Coliseo del Pueblo"	Si	No	Si	El colector pluvial "Coliseo del Pueblo" en el nodo N2-6 y N2-7 se desborda y represa en los tramos N2-8 al N2-10.
Interceptor Oriental Primer Sector	No	No	Si	El colector sanitario Interceptor oriental primer sector en el tramo N3-0 al N3-1 sufre sobrecarga, sobre la Calle 10 con carrera 66
Calle 13 Capri	No	No	Si	El colector combinado Calle 13 "Capri" se sobre carga en el tramo N4-30 – N1-25, a la entrega del canal Pasoancho 1.

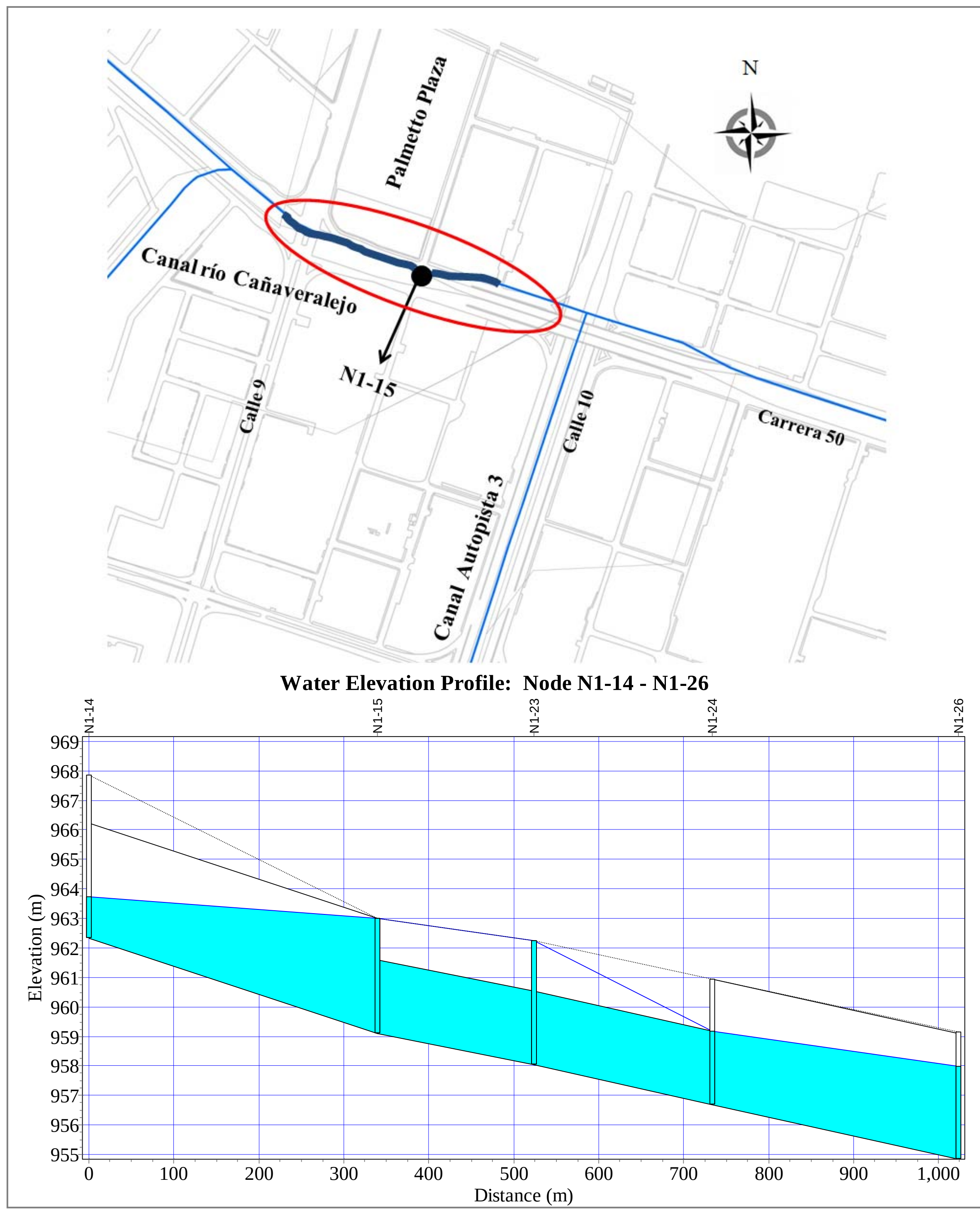


Figura 8.20. Vista en planta y perfil de la zona de desbordamiento del canal río Cañaverale-jo Tr=10.

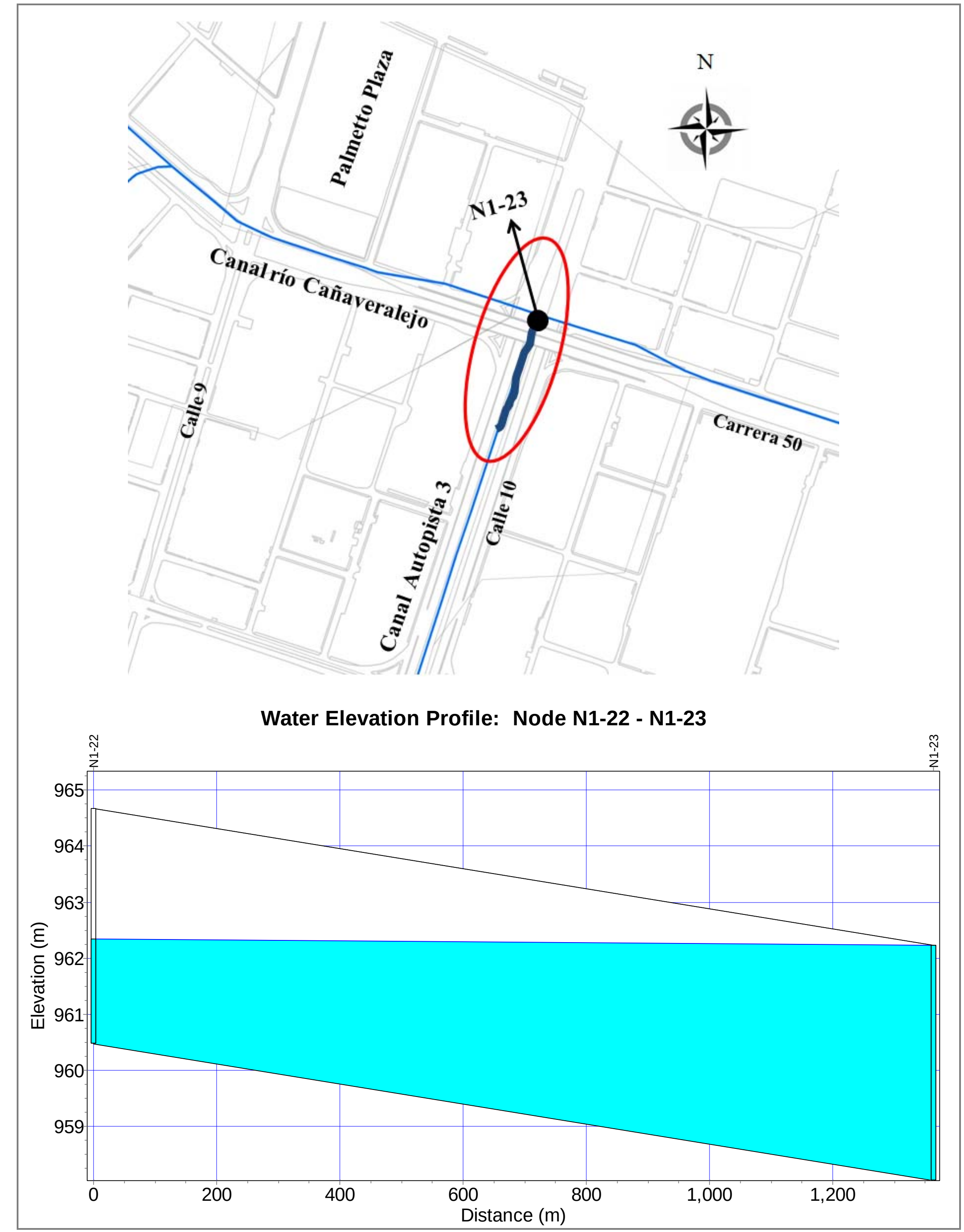


Figura 8.21. Vista en planta y perfil de la zona de la desbordamiento del canal Autopista 3 Tr=10 años.

En la Figura 8.22 se observa la vista en planta y el perfil de la zona de desbordamiento del colector pluvial “Coliseo del Pueblo”.

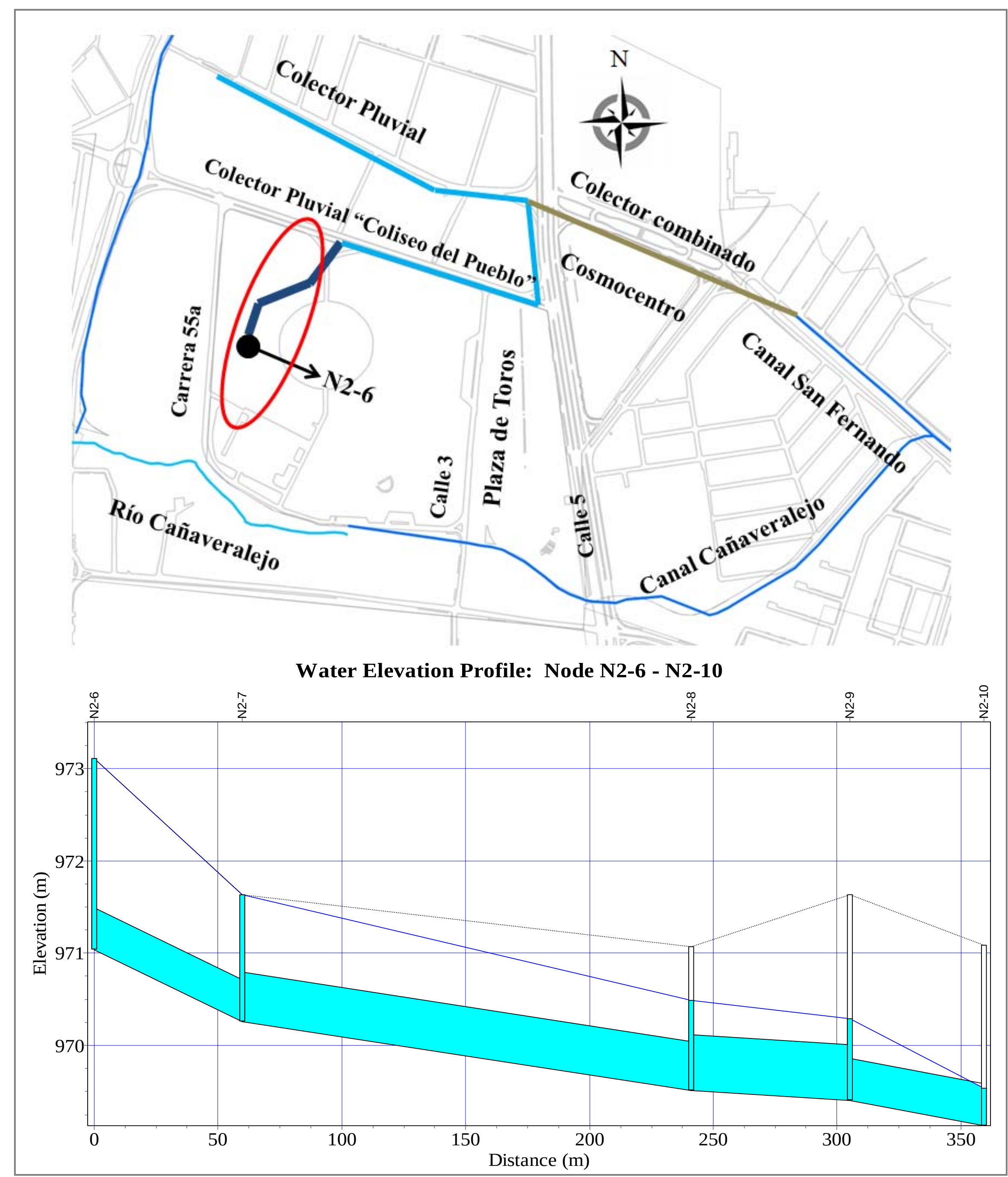


Figura 8.22. Vista en planta y perfil, de la zona de desbordamiento del colector pluvial "Coliseo del Pueblo" Tr = 10 años

➢ *Escenario con SUDS asociados a lluvias con periodos de retornos de 10, 20 y 50 años*

La implementación de los escenarios SUDS; comprende la esquematización de estos y evaluación, para lluvias asociadas a periodos de retorno de 10, 20 y 50 años, en la zona propuesta, como lo muestra la Figura 8.11. Para la representación de las técnicas SUDS en el

SWMM se siguió la metodología propuesta por los manuales (Gironás *et al.*, 2009; Gironás *et al.*, 2010) los cuales proponen dejar las subáreas existentes y darles propiedades del SUDS que se quiere representar, o adicionar nuevas subáreas y utilizar el "módulo de control de LID" en donde se encuentran predeterminados cinco tipos de estas técnicas.

Para el caso en particular se añadieron nuevas subáreas, cambiando las propiedades a la original, estas fueron nombradas suds1 (canchas de futbol coliseo del pueblo) y suds2 (parqueadero de la Plaza de Toros). En el primero se representa un depósito de retención superficial con propiedades de bioreten y en el segundo los pavimentos poros. La Figura 8.23 muestra la esquematización de los SUDS en el modelo SWMM. A continuación se presenta los resultados de este escenario.

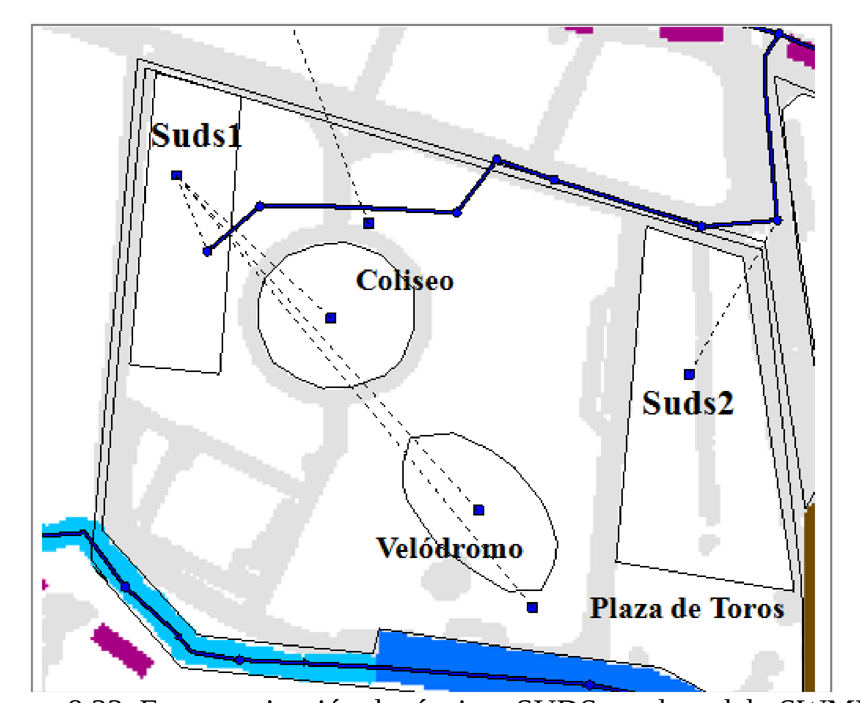


Figura 8.23. Esquematización de técnicas SUDS en el modelo SWMM

- *Depósitos de detención superficiales y bioretenes*

<u>*Esquematización depósito de detención superficial (cachas de futbol Coliseo del Pueblo)*</u>

Se toman dos canchas de futbol para implementar un depósito de detención superficial con propiedades de bioreten, se propone deprimirlas un metro, con un talud de 3:1; Para aumentar la capacidad de infiltración del terreno se consideró colocar una sub-base granular de 0,45 m en el lecho, además de instalar una tubería perforada para la evacuación de la escorrentía almacenada. En la Tabla 8.10 se presentan los elementos de pre dimensionamiento del depósito de detención superficial (canchas Coliseo del Pueblo), en la Figura 8.24 se observa la vista en planta y el perfil del depósito de detención superficial.

Tabla 8.10. Depósito de detención superficial (canchas de futbol)

Área (m^2)	13926
Talud	m = 3 (18º26')
Volumen de Almacenamiento (m^3)	13794
Depresión (m)	1
Sub-base granular (m)	0,45

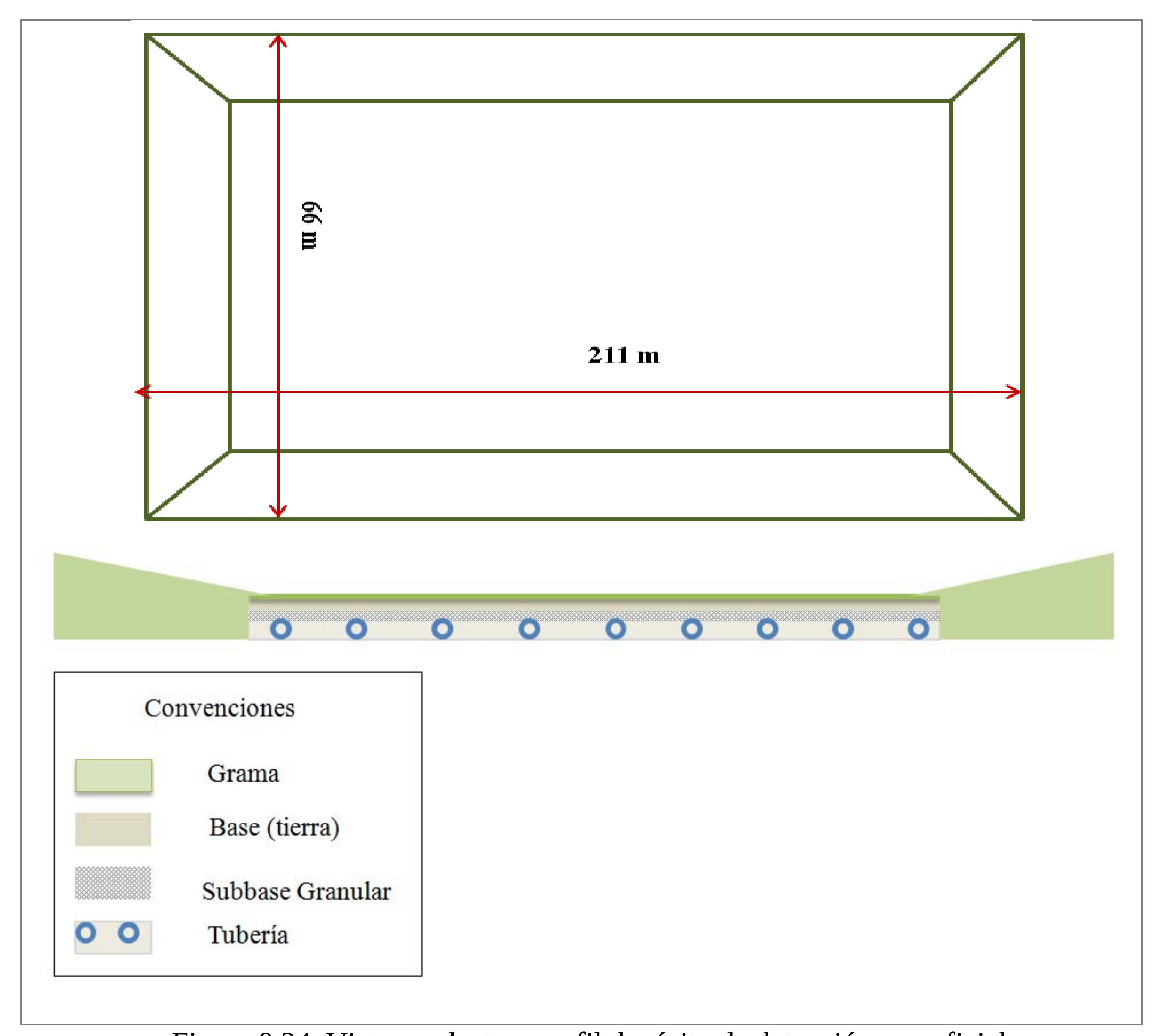


Figura 8.24. Vista en planta y perfil depósito de detención superficial

Los datos aplicados para simular el depósito de retención superficial, se tomaron de acuerdo a las características del suelo, a la esquematización propuesta anteriormente y los valores recomendados por (Gironás *et al.*, 2009; Gironás *et al.*, 2010). Estos se pueden observar en la Tabla 8.11.

Tabla 8.11. Parámetros de simulación de depósito de detención superficial.

Superficie	Valores
Profundidad de la superficie (mm)	1000
Fracción de volumen de vegetación	0,10
Rugosidad de la superficie (n Mannings)	0,15
Pendiente de la superficie (%)	0,99
Almacenamiento	
Altura (mm)	450
Relación de poros	0,75
Conductividad (mm/h)	250

Suelo	Valores
Espesor (mm)	100
Porosidad	0,437
Capacidad de Campo	0,105
Punto de marchites permanente	0,047
Conductividad (mm/h)	0,7085
Cabeza de succión (mm)	60,96
Desagüe subterráneo	
Coeficiente de drenaje (mm/h)	14,14
Exponente de drenaje (mm)	0,5

Esquematización pavimentos poros (parqueadero Plaza de Toros Cañaveralejo)

El tipo de pavimentos poros a implementar en el parqueadero de la Plaza de Toros son bloqueas prefabricados de hormigón, impermeables con juntas permeables como se menciona en el numeral 8.2.2; la base y la subbase tiene propiedades permeables lo cual permite que la escorrentía se infiltre, con el propósito de ser evacuada al sistema de alcantarillado; por medio de estructuras plásticas que drenan subterráneamente el agua infiltrada a través de los firmes. Además se propone deprimir la zona 0,1 metros, con el propósito de almacenar la escorrentía generada en el lugar, aumentando el tiempo de retención de esta y así controlar el caudal pico. En la Tabla 8.12 se observan los elementos del pre dimensionamiento de los bloques impermeables con juntas permeables y en la Figura 8.25 el perfil y el adoquín seleccionado.

En la investigaciones de (Hernández, 2008), concluye que los adoquines con ranuras elíptica, tiene mejor capacidad de infiltración para superficies horizontales, o pendientes del 10%, También poseen una mayor resistencia a la colmatación, siempre y cuando se realice un mantenimiento periódico a estos. En cuanto a la capacidad portante esta depende del espesor de la base, la subbase y las dimensiones del bloque; para el caso del parqueadero de la Plaza de Toros se propone usar un adoquín de 8 cm de espesor, sobre una cama de arena de 5 cm y 35 cm de capa granular (Figura 8.27), además de unas celdas de drenaje (Figura 8.26), la cual puede llegar a resistir de quince a veinticinco vehículos pesado por día, según Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO), se determina transporte pesado H-20, el tiene un peso por eje de 1814 kg y 7257 kg respectivamente.

Tabla 8.12. Características de pre dimensionamiento de pavimento poroso (Parqueadero Plaza de Toros)

Características del terreno	
Área (m^2)	32718
Talud	m = 3 (18º26')
Volumen de Almacenamiento (m^3)	3271
Depresión (m)	0,1
Espesor de las secciones permeables para adoquín	
Adoquín (m)	0,08
Base granular (m)	0,05
Sub-base granular (m)	0,35
Celda de drenaje (m)	0,05

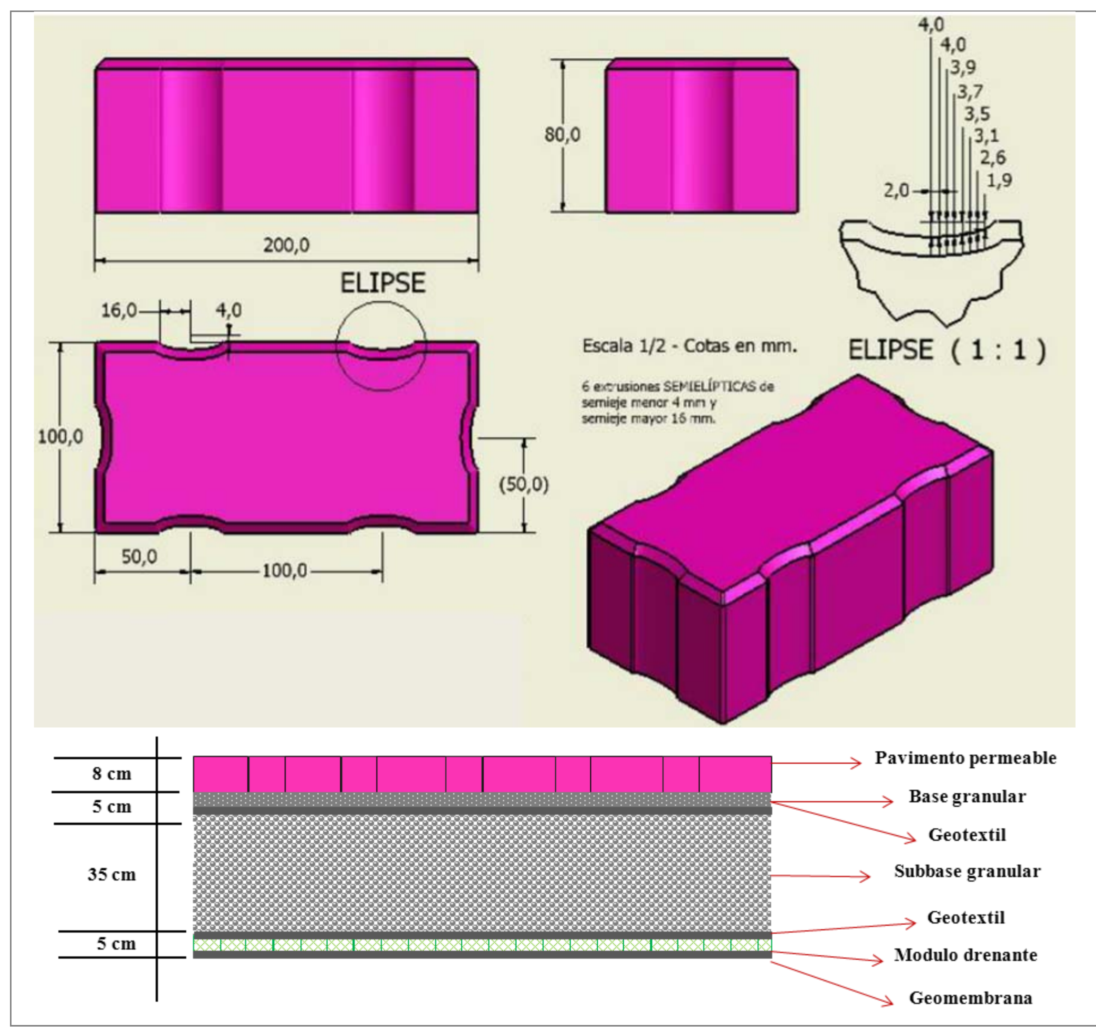


Figura 8.25. Vista en planta y perfil de adoquín “permeable”
Fuente: Adaptado de (Hernández, 2008)



Figura 8.26. Celda de drenaje
Fuente: (Hernández, 2008)



Figura 8.27. Capa granular (árido calizo)
Fuente: (Hernández, 2008)

Los datos aplicados para simular los pavimentos poros, se tomaron de las recomendaciones del estudio (Hernández, 2008), la esquematización propuesta anteriormente y los valore recomendados por (Gironás *et al.*, 2009; Gironás *et al.*, 2010). Estos se pueden observar en la Tabla 8.13.

Tabla 8.13. Parámetros de simulación de pavimentos poros.

Superficie	Valores	Pavimento	Valores
Profundidad de la superficie (mm)	100	Espesor (mm)	80
volumen de vegetación (fracción)	0,0	Relación de poros	0,15
Rugosidad de la superficie (n Mannings)	0,011	Permeabilidad (mm/h)	225
Pendiente de la superficie (%)	0,99		
Almacenamiento		Desagüe subterráneo	
Altura (mm)	450	Coeficiente de drenaje (mm/h)	10,60
Relación de poros	0,75	Exponente de drenaje (mm)	0,5
Conductividad (mm/h)	250		

Luego de la esquematización de las técnicas se comparar los resultados de la modelación de los escenarios con SUDS y sin SUDS.

Comparación de resultados con SUDS y sin SUDS depósito de detención superficial "Coliseo del Pueblo" y pavimentos poroso "Parqueadero Plaza de Toros"

Se evaluó la producción de escorrentía en el área de implementación de los SUDS, como también en dos puntos aguas debajo de estos. (Figura 8.28), para eventos lluvias asociados a periodos de retorno de 10 años. Observando la eficiencia de estos. Se tomaron los nodos N2-12 (a), N4-3 (b) y N1-14 (c), como puntos de referencia para comparar los caudales evacuados de la zona. Para este propósito se modifica la esquematización del escenario sin SUDS, cambiando el diámetro de la tubería en los nodos N2-6 al N4-2, dándole la capacidad suficiente de transportar el caudal de escorrentía de la zona; para hacer la comparación del escenario con SUDS y sin SUDS, en los nodos de verificación propuestos. En la modelación se encontró que las técnicas SUDS aplicadas poseen una alta eficiencia para laminar caudales picos en los eventos evaluados. Pero a medida que se aleja el punto de aplicación de estos se va diluyendo su efecto. Este fenómeno se observa en las Figuras 8.29, 8.30 y 8.31, en la Tabla 8.14, se presenta el efecto de los SUDS en la reducción del caudal pico.

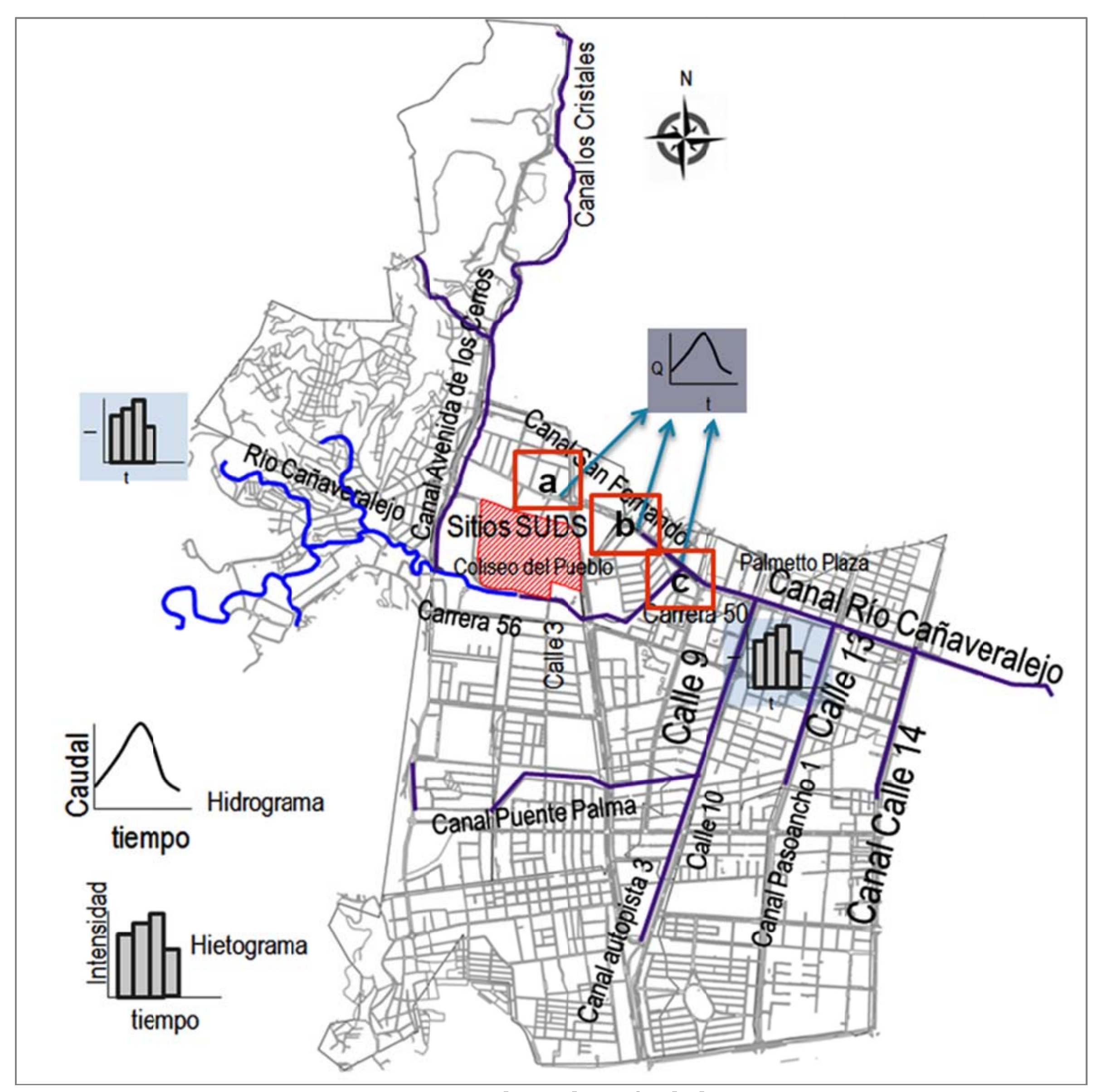


Figura 8.28. Zona de evaluación de los SUDS

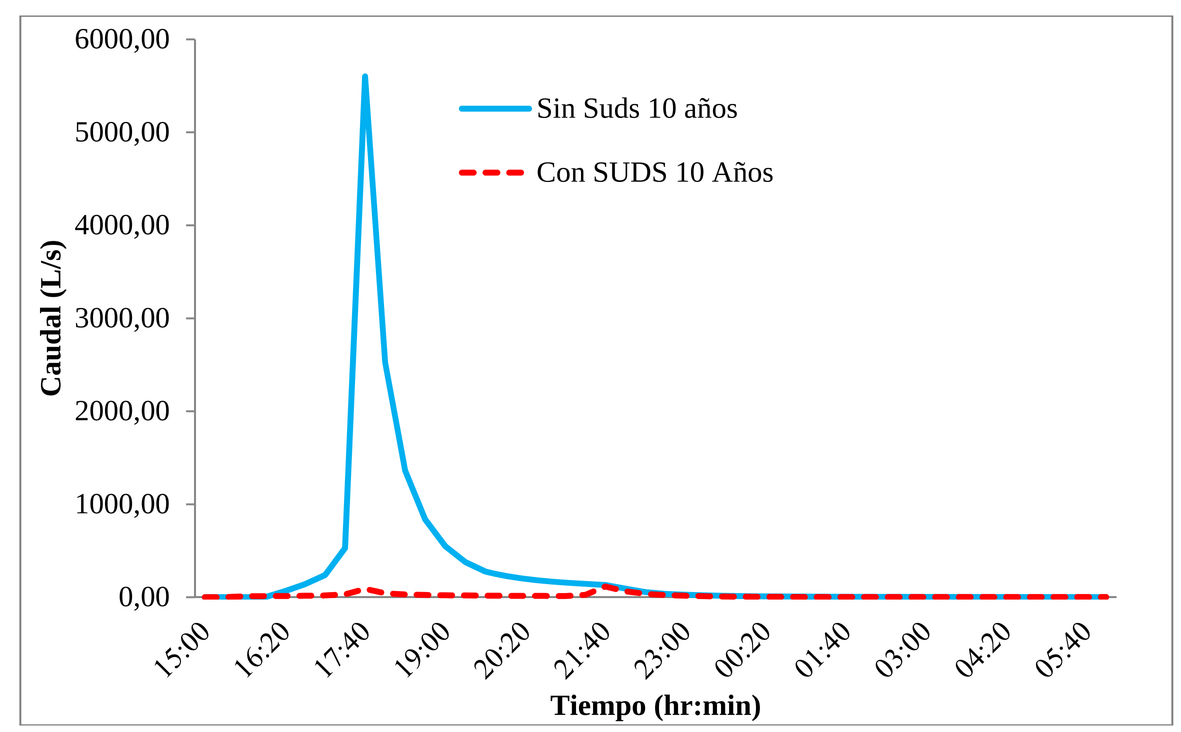


Figura 8.29.Comparación de caudales en el nodo N2-12 punto (a), para Tr = 10 años

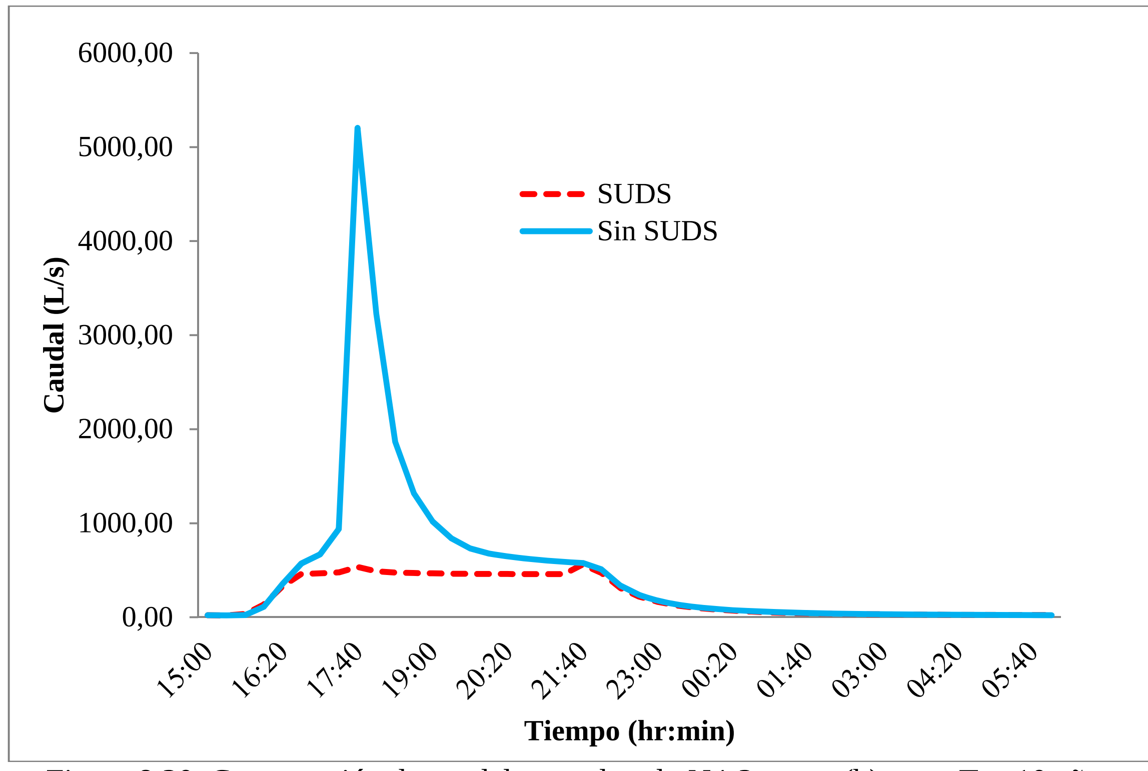


Figura 8.30. Comparación de caudales en el nodo N4-3 punto (b), para Tr =10 años

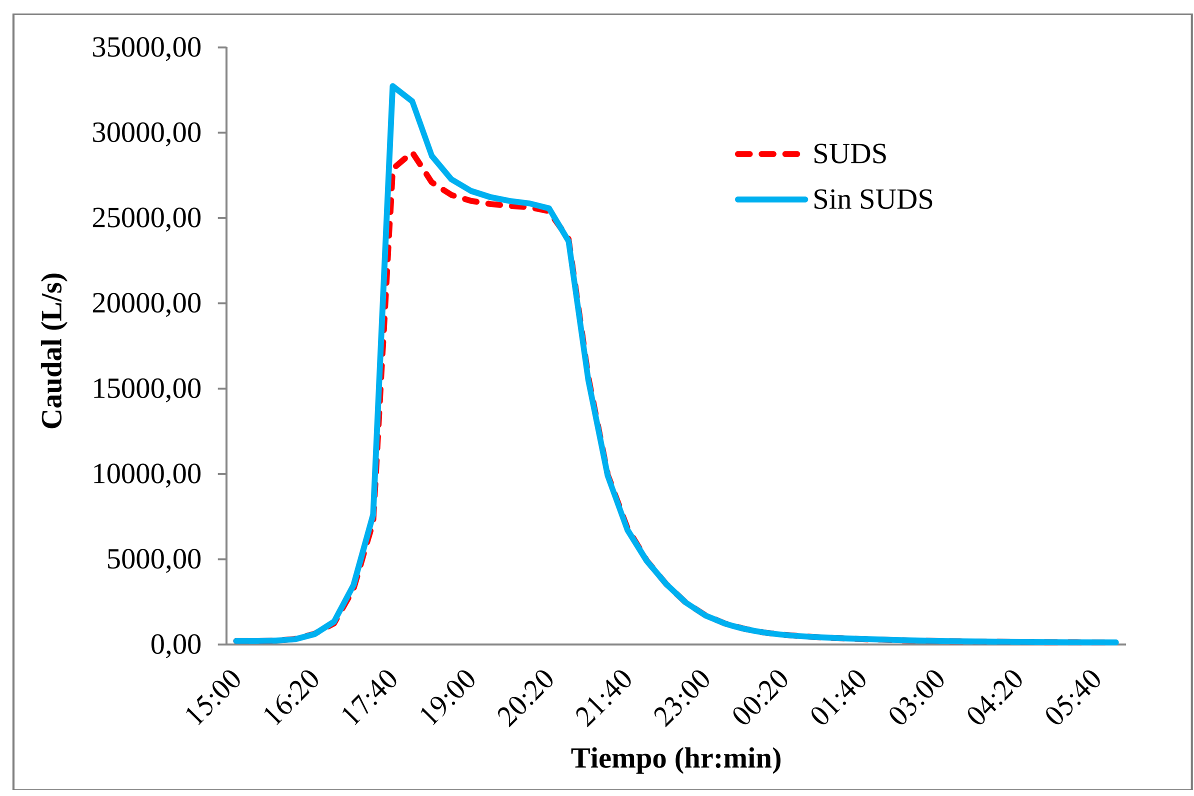


Figura 8.31. Comparación de caudales en el nodo N1-14 punto (c), para Tr = 10 años

Tabla 8.14. Efecto de los SUDS en la reducción del caudal pico

Hidrograma en el punto	Área Tributaria (ha); % área urbana	Sin SUDS	Con SUDS	Reducción del Caudal pico (%)
		Caudal pico (L/s)		
A	23 (1.7%)	5599	90	98,4%
B	98,7 (7.14%)	5203	560	89,2%
C	392,7 (28,4%)	28846	32727	10,3%

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES

- Al analizar la evolución histórica de la cuenca del río Cañaveralejo, ésta paso de ser un cauce natural, a formar parte del sistema del alcantarillado de la ciudad de Cali. Esto unido a la deforestación en la cuenca alta, los asentamientos de desarrollo incompleto y la impermeabilización, en la cuenca media y baja, ha incrementado la frecuencia y magnitud de las inundaciones.

- Los sistemas de drenaje urbanos sostenibles más adecuado para la cuenca baja del río Cañaveralejo, de acuerdo a sus características, según la metodología de (CIRIA, 2007) y (Duque, 2010), corresponden a la combinación de las siguientes estrategias: depósitos de detención superficial y los pavimentos porosos.

- Al aplicar el modelo SWMM para una lluvia de Tr=10 años el sistema de drenaje urbano de la cuenca del río Cañaveralejo, resulta ser insuficiente, por lo cual se generan inundaciones. Esta condición se presenta, sin considerar los efectos de las empalizadas y sedimentación de cauces naturales y conductos, lo cual implica que el sistema podría presentar inundaciones aún para periodos de retornos menores a 10 años.

- La combinación de los SUDS evaluados en área urbana de la cuenca del río Cañaveralejo, tiene una reducción en el caudal pico del 98% cuando se considera el área tributaria en el entorno de los SUDS (23 ha).

- Este porcentaje de reducción disminuye a medida que el área tributaria se incrementa. Cuando el área considerada corresponde aproximadamente a una tercera parte del zona urbana la reducción del pico corresponde únicamente al 10% del caudal pico.
- Con la aplicación de los sistemas de drenaje sostenible, propuesto la infraestructura de colectores pluvial de la zona, no requiere ser optimizado o cambiada, para lluvias con periodo de retorno de 10 años.

9.2 RECOMENDACIONES

- Se debe recuperar la capacidad hidráulica del embalse de Cañaveralejo, pues este hace parte esencial para la regulación de caudales picos y control de inundaciones en la cuenca baja.

- Para evitar el deterioro de la cuenca rural y urbana del río Cañaveralejo, se requiere de la búsqueda de estrategias innovadoras. La implementación de este tipo de estrategias requiere una visión holística e involucrar a los actores claves de manejo del recurso hídrico en la cuenca.

- Las instituciones relacionadas con la GIRH en la ciudad y en la región pueden realizar un trabajo conjunto con las universidades y grupos de investigación, para el desarrollo de proyectos que involucren SUDS a escala piloto y real.

- Los proyectos de demostración servirán para estimar costos a nivel local y pueden ser útiles en el proceso de formulación de políticas y normatividad para estimular la utilización de SUDS.

- Las instituciones relacionadas con la GIRH en la ciudad y en la región pueden realizar un trabajo conjunto con las universidades y grupos de investigación, para el desarrollo de proyectos que involucren SUDS a escala piloto y real.

- Los proyectos de demostración servirán para estimar costos a nivel local y pueden ser útiles en el proceso de formulación de políticas y normatividad para estimular la utilización de SUDS.

10. BIBLIOGRÁFIA

Alcaldia Municipal, C. (1996). Plan para la mitigación de riesgos en Cali, Universidad del Valle. Observatorio Sismologico del Suroccidente, Cali, 189.

Arnold, M., & Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de los Sistemas. en: Cinta de Moebio, Facultad de Ciencias Sociales de la Universidad de Chile, Santiago de Chile, 12.

Bayon, J. R., Hernández, J. R., Fuente, E. G. U., & Fresno, D. C. (2006). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. SUDS. GITECO, Cantabria - España, 25.

Bego, I., & EMCALI. (2009).Levantamiento topográfico canal embalse río Cañaveralejo. D. d. Ingeniería. Cali.

Bitting, P. E. J. (2006). A Methodology and Evaluation Toll for Comparing Post-constrution Storm Water Best Management Practises. Master. Cambridge University, Cambridge, 58.

Boughton, W., & Droop, O. (2003). Continuous simulation for design flood estimation--a review. Environmental Modelling & Software, 18(4), 309-318.

Brooks, D. (1990). ¿Que Significa Realmente Desarrollo Sostenible? , CIID, Ottawa.

Butler, D., & Davies, J. W. (2004). Urban Drainage. Spon Press, London, 566.

Caicedo, A. (2010). Marco de la Ecologico de la cuenca del río Cañaveralejo. en: Cali ciudad de las aguas. Documento en preparación, Colegio Ideas, Cali, Colombia.

Cardenas, M. J. (2008). Comparación y analisis de metodologías de calibración del modelo lluvia-escorrentia, SWMM, en cuencas urbanas - caso ciudad de Girardot. Maestria. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 210.

Castro Aragon, E. C., & Carrasco Villota, L. E. (2011). Utilización de modelos matemáticos para la formulación de una propuesta de gestión ambiental en la zona Noroccidental del rio Cali.

Castro, D., Rodríguez, J., Rodríguez, J., & Ballestero, F. (2005). Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible (SUDS). Interciencia, 30(5), 255.

Castro, M. (1992). Desarrollo Urbano de Cali 1940 - 1960. Pregrado. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 133.

CDM, I., & Rossman, L. A. (2010). Storm Water Management Model (SWMM). U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Ohio.

Cereve, Tauw BV, Chalmers University of Technology, Technical University of Denmark, Middlesex University, National Technical University of Athens, DHI Hydroinform, Sieker GmbH, Water Pollution Unit at Laboratoire Central des Ponts et Chaussees, & Lulea University of Technology. (2010). DayWater "Adaptive Decision Support System for Stormwater Pollution Control",. <http://daywater.in2p3.fr/EN/gfx/bmp/performances/Performance28.pdf>.

CIRIA, D. (2001). Sustainable urban drainage systems, best practice manual for England, Scotland, Wales and Northern Ireland. CIRIA, Classic House, London, 132.

CIRIA, D. (2007). The SUDS Manual. CIRIA, Classic House, London, 606.

Corporación de Estudios Ambientales y Culturales Claustro Abierto. (2009).Caracterización Biofísica, social y de Infraestructura para la Formulación del POMCH de la Cuenca de los Ríos Meléndez, Lilí y Cañaveralejo en el Marco del Proyecto DAGMA BP 42442. Cali, Colombia, 413.

CVC. (1960).proyecto Aguablanca, Informe de Avance de Obras. CVC. Cali, Colombia.

CVC. (2001).Sistema de Información Geográfica de la Unidad de Manejo de Cuencas Cali-Meléndez - Pance - Aguacatal. CVC. Cali, Colombia, 180.

CVC. (2011). Precipitaciones en Cali superaron los registros históricos. <http://www.cvc.gov.co/vsm38cvc/xapps/newsService/bin/newsDetail.php?PHPSESSID=cjkoj7mjia36rkqhkum6dp0bm5&id=2712&fromMy=2> (Noviembre 09 2011).

CVC, & Universidad del Tolima. (2008). Caraterización de los bosques naturales y zonificación de las tierras forestales en las cuencas hidrograficas de los ríos, Zonificación forestal. en: Convenios interaministrativos CVC No. 072 de 2005 y No. de 2007, Cali, Colombia.

Choi, K.-s., & Ball, J. E. (2002). Parameter estimation for urban runoff modelling. Urban Water, 4(1), 31-41.

DAGMA. (2006a).Agenda Ambiental, Comuna 10, Av. Pasoancho. Cali, Colombia.

DAGMA. (2006b).Agenda Ambiental, Comuna 17, Universidad del Valle. Cali, Colombia.

DAGMA. (2006c).Agenda Ambiental, Comuna 18, Batallón pichicha. Cali, Colombia.

DAGMA. (2006d).Agenda Ambiental, Comuna 19, Estadio pascual guerrero. Cali, Colombia.

DAGMA. (2006e).Agenda Ambiental, Comuna 20, Siloé. Cali, Colombia.

DayWater. (2005). Filter Drains: Performance Data. Adaptive Decision Support System (ADSS) for the Integration of Storm Water Source Control into Sustainable Urban Water Management Strategies, 3.

Delgado, A., & Pulido, S. M. (2005). Modelación Hidrodinámica del Sistema de Drenaje Urbano de la Ciudad de Cali en el Área de Influencia del Río Cali. Pregrado. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 135.

Diario El País, S. A. (2008). Torrencial Aguacero Colapsó El Sur De Cali. <http://www.elpais.com.co/paisonline/calionline/notas/Julio042008/cali1.html> (Marzo 26, 2010).

Diario El País, S. A. (2009). Aguacero Inundó el Sur de la Ciudad. <http://www.elpais.com.co/paisonline/calionline/notas/Marzo212009/cali7.html> (Abril 30, 2010).

Diario El País, S. A. (2010). 40 Barrios Inundados por el Aguacero en cali. <http://www.elpais.com.co/paisonline/notas/Abril092010/nortecalicolpasado.html> (Abril 30, 2010).

Diario El País, S. A. (2011). Inundaciones en Cali: vea la emergencia de esta mañana en imágenes. <http://www.elpais.com.co/elpais/invierno/fotos/inundaciones-en-cali-vea-emergencia-esta-manana-en-imagenes> (08 de Noviembre, 2011).

Duque, M. F. (2010). Selección de tecnología para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en áreas urbanas. Pregrado. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 82.

Elliott, A., & Trowsdale, S. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. Environmental Modelling & Software, 22(3), 394-405.

EMCALI. (2007).Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos 2007 - 2016. Unidad Estrategica de Negocios de Acueducto y Alcantarillado. Emcali. Cali, Colombia, 324.

Forero, R., & Franco, D. M. (2003). Estudio hidrológico e hidrodinámico del sistema de drenaje pluvial de la zona suroccidental en Santiago de Cali mediante la simulación numérica. Pregado. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 78.

Galvis, A. (1986). El Modelo SWMM y el Sistema de Drenaje Urbano.

Galvis, C. A. (1996). El modelo SWMM y el sistema de drenaje urbano. en: Curso Internacional Sistemas de Alcantarillado, Cinara, Cali, Colombia, 71.

Gamba, N. E. (2008). Estrategias de Acción para la Contribución con la Recuperación del río Cañaveralejo (Cali-Colombia) Apoyadas en la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Magister Universidad del Valle, Cali, Colombia, 168.

Gironás, J., Roesner, L. A., & Davis, J. (2005). SWMM Modelo de Gestión de Aguas Pluviales 5.0 vE Manual de Usuario. GMMF, ed., Universidad Politecnica de Valencia, Valencia.

Gironás, J., Roesner, L. A., & Davis, J. (2009). Storm Water Management Model Applications Manual, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

Gironás, J., Roesner, L. A., Rossman, L. A., & Davis, J. (2010). A new applications manual for the storm water management model (swmm). Environmental Modelling & Software, 25(6), 813-814 & 1364-8152.

Google, i. (2011). Google Earth (versión 6.1.7601.1). Google Earth es un programa informático similar a un Sistema de Información Geográfica (SIG).

GWP. (2005). Estimulando el cambio: Un manual para el desarrollo de estrategias de gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) y de optimización del agua. Estocolmo.

Hernández, R. j. (2008). Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráficos ligeros. Doctoral. Universidad de Cantabria, Santander, España, 515.

HIDROINGENIERIA LTDA, & DAGMA. (2000).Estudio de Caudal Ecológico, Balance Hídrico, Indicador Ambientales e Inventario del Recurso Hídrico en los ríos Cali, Aguacatal, Cañaveralejo y Melendez del Munícipio de Santiago de Cali. Plan del Río - Informe final Documento Técnico Río Aguacatal. DAGMA. Cali, Colombia.

HIPERAGUAS, & EMCALI. (2007).Diseño de la Sectorización de la Red de Acueducto y Optimización del Servicio de alcantarillado Mediante la Implementación del Modelo de Simulación Hidráulico. Contrato Nº 300-GAA-CC-452-2005, Evaluación de Estructuras de Separación. V1. EMCALI. E. Cali, Colombia, 44.

Jiménez, P. N. (2005). Elementos Históricos y Urbanos en la Generación de Desastres por Inundaciones y Deslizamientos en Cali, 1950 -2000. Pregrado. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 218.

Jopia, C. R. (2007). Curso de Análisis y Rehabilitación de Redes de Alcantarillado Mediante el Código SWMM 5.0. en: Introducción A EPA SWMM 5.0, G. d. R. Flumen, ed., Flumen, Barcelona.

Jopia, C. R. (2009). Análisis de Cuencas Urbanas Usando EPA SWMM 5.0 (Notas de Clase). Grupo de investigación Flumen UPC, Barcelona.

Latorre, E. (1996). Teoría General De Sistemas, Universidad Del Valle, Cali, Colombia, 217.

Lockie, T. (2009). CATCHMENT MODELLING USING SWMM.

MANOV, Analisis Ambientales, & EMCALI. (2007a).Obras Embalse Cañaveralejo. Contrato Nº 300-GAA-CC-133-2006. EMCALI. Cali, Colombia, 120.

MANOV, Analisis Ambientales, & EMCALI. (2007b).Plan de Acción Junio 2007. Consultoria para Establecer las Estrategias y Elaborar los Diseños de las Estructuras Hidráulicas Requeridas, que Disminuyan el Impacto de la Contaminación del Sistema de Drenaje Sur en las Aguas Captadas para las Plantas de Puerto Mallarino y Río Cauca. Contrato N° 300-GAA-CC-133-2006. Unidad Estrategica de Negocios de Acueducto y Alcantarillado. Emcali. Cali, Colombia, 130.

Marsalek, J., Jimenez-Cisneros, B., Malmquist, P., Karamouz, M., Goldenfum, J., & Chocat, B. (2008). Urban water cycle processes and interactions, Unesco, Paris.

Massoudieh, A., Abrishamchi, A., & Kayhanian, M. (2008). Mathematical modeling of first flush in highway storm runoff using genetic algorithm. Science of The Total Environment, 398(1-3), 107-121.

Mayorquín, R., & Astrid, J. (1997). Evaluación de Diferentes Métodos para Determinar máximos en las Cuencas de los Ríos Cali, Pichindé, Cañaveralejo, Meñendez y Lili. Pregrado. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 120.

McCourt, W. J., & Verdugo, G. (1985). Mapa Geológico Preliminar, Plancha 300, Jamundí. Ingeominas - BGS, Bogotá, Colombia.

National SUDS Working Group. (2004). Interim Code of Practice for Sustainable Drainage Systems. National SUDS Working Group, London.

Oficina de Planeación Municipal. (1976). Cali 1976. Cali, Colombia.

Orozco, A., & Saldarriaga, J. (2005). Calibración de modelos hidráulicos de alcantarillados. Universidad de los Andes, Bogotá DC, Colombia. Disponible en: http://www. tudelft. nl/live/ServeBinary.

Osorio, J. C. (2008). Introducción Al Pensamiento Sistémico, Universidad Del Valle, Cali, Colombia, 120.

Palacios, S. M. (2006). Manejo del Recurso Hídrico y Estrategias para su Gestión Integral en la Microcuenca Mijitayo, Pasto Colombia. Magister. Centro Agronómico Tropical de Investigciones y Enseñanzas Turrialba, Costa Rica, 194.

Perales, S., & Domenech, I. (2007). Los Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible: Una Alternativa A La Gestión Del Agua De Lluvia. Equipamiento y Servicio Municipales(133), 66 -77.

Pérez, N. I. (2007). Determinación de la Viabilidad Técnica y Económica de un Sistema de Almacenamiento Temporal de Aguas de Drenaje Urbano para la Ciudad de Bogotá. Pregrado. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 201.

Prochat, V. (2008). Principios de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Bases para el desarrollo de planes nacionales.

Rodríguez, A. (2008). Argentina Plan Nacional Federal de los Recursos Hídricos. 1 Ed., Graficas especiales S.A., Asunción, 180.

Rosales, C. I. (2001). Sobre el Comportamineto Sísmico de los Depósitos de Suelo del Área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Pregrado. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 296.

Rossman, L. A. (2010). Storm water management model user's manual, version 5.0, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

Suárez, D. P., & Zea, D. A. (2003). Selección de Tecnología para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas por Métodos Naturales: Una Metodología con Énfasis en Aspectos Tecnológicos. Pregrado. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 194.

The Environment Agency, The Scottish Environment Protection Agency (SEPA), & The Environment and Heritage Service in Northern Ireland. (2010). Sustanaible Drainage Systems (SUDS) An Introduction. Environment Agency, Almondsbury, 28.

Torres, A. E. (2004). Apuntes de clase sobre hidrología urbana. 21 Ed., Potificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 377.

Universidad del Valle. (2010). Conceptual Framework for the Decontamination and Recuperation of Water Resources in the Municipality of Cali, “Master Plan”. Universidad del Valle, UNESCO - IHE, Cali, Colombia.

Universidad del Valle, DAGMA, CVC, & ACODAL. (2004a). Informe ejecutivo, Identificación de vertimientos puntuales y tomas de agua en los cauces de los río Meléndez, Cañaveralejo y quebradas afluentes en el perímetro urbano del municipio de Santiago de Cali. Cali, Colombia.

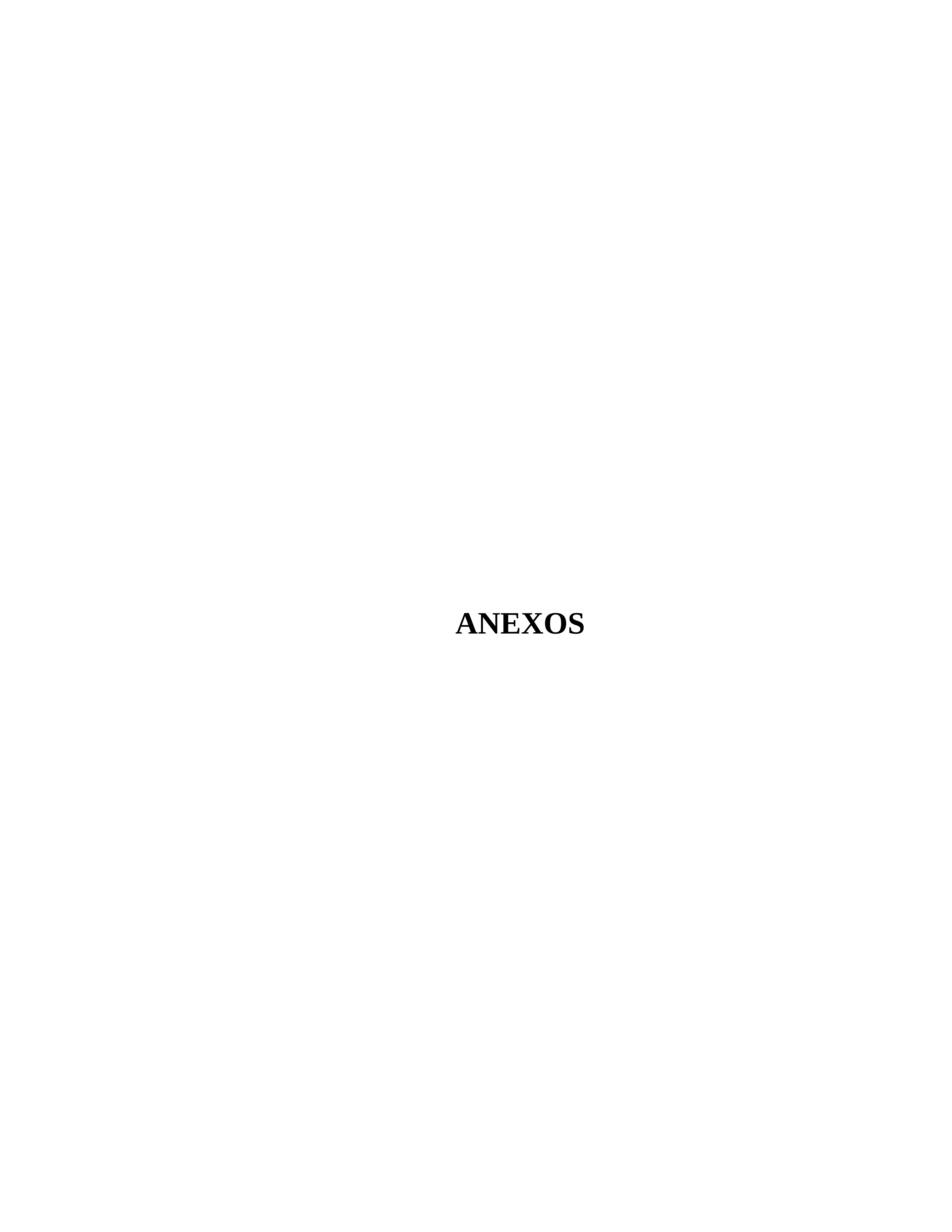
Universidad del Valle, DAGMA, CVC, & ACODAL. (2004b).Informe Final, Río Cañaveralejo, Identificación de Vertimientos Puntuales y Tomas de Agua en los Cauces de los ríos Meléndez, Cañaveralejo y Quebradas Afluentes en el Perímetro Urbano del Municipio de Santiago de Cali. Convenio DAGMA-UNIVALLE 010-2003. DAGMA. Cali, Colombia, 242.

Valentín, G. M. (2006). Curos Hidrología Urbana. Distribuidora Alfambra de Papelería, S.L Ed., Flumen, Barcelona, España, 396.

Verdugo, G., & Aspden, J. (1984). Mapa Geológico Preliminar, Plancha 299 Jamundí Ingeominas - BGS, Bogotá, Colombia.

Von, L. (2000). Teoría General De Los Sistemas: Fundamentos, Desarrollo, Aplicaciones, Fondo De Cultura Económica Ltda, Bogotá, Colombia, 311.

Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models. Environmental Modelling & Software, 16(3), 195-231.



ANEXOS

Anexo 1
Usos del Suelo de las Comunas del Área de Influencia del río Cañaveralejo

Tabla A1.1 Usos del Suelo de las Comunas del Área de Influencia del río Cañaveralejo

COMUNA	USOS DEL SUELO
20	Hay predominio del uso residencial. Escasamente se desarrollan actividades comerciales e institucionales. La distribución porcentual de usos del suelo se encuentra distribuida de la siguiente manera: Residencial: 58,05% Comercial: 2% Institucional: 4,4% Vías: 35,55% La mayoría de las zonas verdes se encuentran en zona de riesgo, con problemas de erosión y deslizamientos. Hay ausencia de políticas orientadas a la solución del problema ambiental en materia de recursos naturales.
19	En la comuna predomina el uso residencial. de estratos medios-altos. Los usos del suelo se encuentran distribuidos de la siguiente manera: Residencial: 46,6% Institucional: 16,33% Áreas libres o lotes baldíos: 14,11% Comercial y de servicios: 3,17% Sin embargo se ha dado una intensa transformación en los usos del suelo propiciando especialmente una transformación en actividades institucionales como la salud, educación, comercio, recreación y deportes, entre otras.
10	El uso de los suelos es primordialmente residencial en la comuna. También hay otros usos como las actividades comerciales, institucionales, industriales y de servicios En la comuna existe un 7,44% de zona verde, la proporción de zona verde por habitante es de $2.81m^2$, con un nivel inferior al promedio de la ciudad. El suelo de la comuna es plano, sin riesgos de fallas o hundimientos, el nivel freático se encuentra entre 1 y 2 metros de profundidad.
18	La Comuna se caracteriza en sus usos del suelo por ser básicamente residencial de estratos socioeconómicos bajo-bajo, bajo y medio bajo. En ella se destacan como usos institucionales el batallón Pichincha, el cual ocupa una buena área de la Comuna y los Hospitales "Siquiátrico San Isidro" y Mario Correa Rengifo. A pequeña escala existe comercio en la comuna.
17	En la comuna los usos del suelo son, el residencial complementado con los usos comerciales, de servicios e institucionales, especialmente educativos. Usos Comerciales y de Servicios se localizan sobre los principales ejes viales (Calle 5, Calle 9 Calle 13 y Cra. 100) y en especial en los Centros Comerciales, Ventas de autos, Ventas de muebles. Dentro de los usos institucionales hay un importante número de colegios privados e institucionales de preescolar. Hay usos industriales La comuna 17 se ha desarrollado con buenas condiciones de urbanización, cumpliendo con todos los requisitos de servicios públicos y secciones de zonas verdes y viales, a excepción de pequeñas áreas de los Barrios Primero de Mayo y La Playa, donde predominan barrios de casas espaciosas y bien construidas, generalmente de dos pisos. También se destacan los conjuntos cerrados de casas y apartamentos que cuentan en su mayoría con piscina, áreas verdes y recreativas y zonas de parqueo.

Fuente: (DAGMA, 2006a,b,c,d,e)

Anexo 2
Características de los canales del subsistema Cañaveralejo

Tabla A2.1. Características de los canales - subsistema Cañaveralejo.

Nombre del canal	Ubicación	Tipo de Sección	Longitud (metros)	Caudal a Entrega	Comentarios
Canal Autopista 3	Está ubicado en la comun17 entre los barrios Limonar, Santa Anita, Capri; inicia en la autopista con calle 5 desde la Cr 70 a la Cr 50.	Trapezoidal	2067	Aprox. 160l/s	Se encuentra revestido, le vierten área propia y este a su vez al canal río Cañaveralejo, presenta diez descargas directas y una por estructura de separación, se identifica una basurero al interior del canal
Canal Puente Palma	Está ubicado entre las comunas 17 y 19 en los barrios la Cascada, Puente Palma, Refugio y Gran Limonar; inicia en la Cll 2ª con Cr 65 desde la avenida circunvalación Cll 1 a la autopista sur con Cr 64	Trapezoidal	1272	Aprox. 45 l/s	Se encuentra revestido, impactado por presencia de aguas residuales, residuos sólidos y deterioro paisajístico, le vierte área propia y éste a su vez drena al canal autopista No 3, presenta nueve descargas directas. Hay tres basureros crónicos, uno por basuras y dos escombreras
Canal Pasoancho 1 ó Cll 13	Está ubicado en la comuna 17 en el barrio primero de mayo, sobre la Cl 13 desde la Cr 65 a la Cr 50	Trapezoidal	990	Aprox. Por determinar	Se encuentra revestido, le vierte área propia y a su vez éste le drena al Canal río Cañaveralejo, presenta siete descargas directas y posee un basurero crónico.
Canal Cll 14	Está ubicado en la comuna 17 entre los barrios primero de mayo, Santa Anita, sobre la Cl 14 desde la Cr 65 a la Cr 50	Trapezoidal	800	Aprox. Por determinar	Se encuentra revestido, le vierte área propia y a su vez éste le drena al canal río Cañaveralejo, presenta 13 descargas directas.
Canal Av. de los Cerros	Está ubicado entre las comunas 19 y 20 en los barrios el Lido, Siloé y Belisario Caicedo, sobre la Cl 1 desde la Cr 42 a la Cr 54	Trapezoidal	1495	Aprox. Por determinar	Se encuentra revestido, impactado por presencia de aguas residuales y deterioro paisajístico, le vierte área propia y a su vez le drena al río Cañaveralejo, presenta siete descargas por estructuras de separación.
Canal río Cañaveralejo	Está ubicado en las comunas 10, 17, 19, comprende los B/Nueva Tequendama, San Fernando, Primero de Mayo, Las Granjas, San Judas, Inicia en Cll 3ª con Cr 55B detrás plaza de Toros hasta Cr 50 con Cll 25	Trapezoidal	3908	Aprox. Por determinar	Se encuentra revestido, impactado por presencia de aguas residuales, residuos sólidos y deterioro paisajístico, le vierte el canal san Fernando, autopista 3, Av. Los cerros, Pasoancho 1, calle 14 y éste drena al canal sur. Presenta 41 descargas directas y cuatro por estructuras de separación; posee cinco basureros crónicos uno por escombros y los otros por basuras.
Canal San Fernando	Está ubicado en la comuna 19 en el barrio San Fernando, sobre la Cr 50 desde la Cll 7A a la Cll 8C	Trapezoidal	327	Aprox. Por determinar	Se encuentra revestido, impactado por presencia de aguas residuales, le vierte área propia y su vez éste drena al Canal río Cañaveralejo. Presenta 5 descargas directas

Fuente: Adoptado de (EMCALI, 2007; MANOV *et al.*, 2007b)

Anexo 3
Esquematización del sistema de drenaje en el área de estudio

Tabla A3.1. Esquematización del sistema de drenaje del área de estudio

Canal	Subcuenca	Área Subc (ha)	Ancho subc (m)	Pendiente (%)	% Área im-permeable	coef-n suelo imper	coef-n suelo perme	Alm-Dep-suelo imperm (mm)	Alm-Dep-suelo perm (mm)	% Alm -Dep 0	Decay Horton (mm/hr)	Max. Infil (mm/hr)	Min. Infil (mm/hr)
Canal Calle 14	Calle 14 -2	44,20	400,00	0,45	76,83	0,011	0,15	1,020	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	calle 14 -1	89,04	425,80	0,69	91,40	0,011	0,15	1,020	7,62	25	0,72	47,40	13,90
Canal Pasoancho 1	P 1-3	15,30	42,00	1,28	93,73	0,011	0,15	0,762	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	P 1-2	72,40	349,80	0,68	95,08	0,011	0,15	1,020	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	P 1-1	72,40	425,80	0,82	86,59	0,011	0,15	0,760	7,62	25	0,72	47,40	13,90
Canal Autopista 3	Autop 3-4	13,00	57,00	0,92	91,31	0,011	0,15	0,760	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Autop 3-3	54,10	556,10	0,41	94,03	0,011	0,15	1,270	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Autop 3-2	13,50	13,50	0,66	98,15	0,011	0,15	1,020	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Autop 3-1	164,50	153,80	4,89	96,12	0,011	0,15	0,254	7,62	25	0,72	47,40	13,90
Canal Puente Palma	Palma 1	75,67	614,28	0,74	66,04	0,011	0,15	1,020	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Palma 3	52,00	325,60	0,69	96,73	0,011	0,15	1,020	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Palma 2	61,25	732,32	0,50	87,71	0,011	0,15	1,020	7,62	25	0,72	47,40	13,90
Canal San Fernando	Sanf1	27,67	500,00	0,99	30,94	0,011	0,15	0,760	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Sanf2	94,60	797,76	0,99	79,80	0,011	0,15	0,760	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Sanf3	4,41	279,31	0,99	100,00	0,011	0,15	1,270	1,27	25	0,72	47,40	13,90
	Sanf4	20,00	315,20	1,10	75,95	0,011	0,15	0,760	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Sanf5	9,10	266,90	0,88	86,59	0,011	0,15	0,760	7,62	25	0,72	47,40	13,90
Canal Av. de los Cerros	Cerros	155,25	1334,85	10,54	25,00	0,011	0,15	0,254	7,62	25	0,72	47,40	13,90
Canal Los Cristales	Cristales	109,92	1634,70	23,80	25,00	0,011	0,15	0,254	7,62	25	0,72	47,40	13,90
Canal Cañaveralejo	Caña 1	14,00	14,00	0,81	86,79	0,011	0,15	0,760	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Caña 2	9,00	200,10	0,67	98,00	0,011	0,15	1,020	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Caña 3	17,50	247,10	0,28	96,97	0,011	0,15	1,524	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Caña 4	29,40	418,60	0,14	94,86	0,011	0,15	2,032	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Caña 5	5,40	57,70	0,13	99,07	0,011	0,15	2,030	7,62	25	0,72	47,40	13,90
Rio Cañaveralejo cuenca alta	Caña_alto1	482,54	958,21	16,58	8,53	0,13	0,4	0,254	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Caña_alto2	659,76	1257,82	16,58	8,53	0,13	0,4	0,254	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Caña_alto3	43,14	546,29	15,19	8,53	0,13	0,4	0,254	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Caña_alto4	87,20	557,01	10,85	8,53	0,014	0,15	0,254	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Caña_alto5	85,53	968,48	11,88	8,53	0,014	0,13	0,254	7,62	25	0,72	47,40	13,90
	Caña_alto6	90,11	763,31	24,14	8,53	0,13	0,15	0,254	7,62	25	0,72	47,40	13,90

Anexo 4
Parámetros de calibración preliminar de la cuenca alta del río Cañaveralejo

Tabla A4.1. Parámetros de Calibración de la cuenca alta del río Cañaveralejo

Canal	Subcuenca	Área Subc (ha)	Ancho subc (m)	Pendiente (%)	% Área impermeable	coef-n suelo imper	coef-n suelo perme	Alm-Dep-suelo imperm (mm)	Alm-Dep-suelo perm (mm)	% Alm -Dep 0	Decay Horton (mm/hr)	Max. Infil (mm/hr)	Min. Infil (mm/hr)
Rio Cañaveralejo cuenca alta	Caña_alto1	482,54	920,84	18,17	20,53	0,010	0,15	2,0	7,5	25	15	125	30
	Caña_alto2	659,76	1208,77	18,17	20,53	0,010	0,15	2,0	7,5	25	15	125	30
	Caña_alto3	43,14	524,98	16,65	20,53	0,010	0,15	2,0	7,5	25	15	125	30
	Caña_alto4	87,20	535,29	11,89	20,53	0,010	0,15	2,0	7,5	25	15	125	30
	Caña_alto5	85,53	930,71	13,02	20,53	0,010	0,15	2,0	7,5	25	15	125	30
	Caña_alto6	90,11	733,54	47,31	20,53	0,010	0,15	2,0	7,5	25	15	125	30